2005 年度　修士論文

ヒューマノイドロボットによるものつくりの体系化

指導教授　渡辺嘉二郎

法政大学大学院工学研究科

システム工学専攻修士課程

学籍番号　04R6106

オマタ　ヨシフミ

小俣　善史

SYSTEMATIZATION OF MONOTSUKURI VIA DEVELOPMENT OF HUMANOID ROBOTS

Abstract

Here an approach of systematization of motivative MONOTSUKURI via development of humanoid robots is presented. The MONOTSUKURI is not making machine, manufacture and product, but is dream creation. The improvement of skills of how to make, manufacture and produce machine is attractive but is only to solve the predetermined problems. The dream creation is more attractive than these because it produces new problems. Based on the creative system builded with "verbalization", "action" and "consideration", designer can identify the significant of "play", "skill" and "sensation" which gives the chance to create the dream.

Key Words *: MONOTSUKURI, humanoid robot, motivation*

◇ 目　次 ◇

第１章　ロボットの創造

１．１　ロボットとは　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　７
１．２　ロボットの歴史　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　９
　［１］　自動人形・からくり人形　９
　［２］　産業用ロボット　１０
　［３］　２足歩行ロボット　１０
１．３　ロボットの種類　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　１１
　［１］　多目的ロボット　１１
　　（ａ）　ＡＳＩＭＯ　１１
　　（ｂ）　ＱＲＩＯ　１１
　　（ｃ）　ＨＲＰ　１２
　　（ｄ）　ＣＯＮＣＥＲＯ　１３
　［２］　生活コミュニケーションロボット　１３
　［３］　接客ロボット　１４
　［４］　作業支援ロボット　１５
　［５］　掃除ロボット　１６
　［６］　警備ロボット　１７
　［７］　レスキュー支援ロボット　１７
　［８］　福祉ロボット　１８
　［９］　医療ロボット　１９
　［10］　玩具ロボット　２０
　［11］　キッドロボット　２０
　［12］　特殊ロボット　２１
１．４　ロボットの創造　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２２
　［１］　夢をもつ　２２
　［２］　ものつくり　２３

第２章　ロボットの構造

２．１　メカトロニクス　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２５
２．２　ロボットにおけるメカトロニクスの技術　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２５
　［１］　メカニズム　２５
　［２］　アクチュエータ　２６
　［３］　動力源　２７

［４］　センサ　２７
［５］　コンピュータ装置　２８
［６］　制御　２８
２．３　ロボットの開発システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２９
［１］　ロボット開発の流れ　２９
［２］　ＣＡＤ　３０
［２］　ＣＡＭ　３１
［３］　板金加工　３１
［４］　ＣＡＥ　３２
２．４　ロボットの問題点（これからのテクノロジー）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　３３
［１］　アクチュエータ　３３
［２］　バッテリ　３３
（ａ）　１次電池　３４
（ｂ）　２次電池　３５
（１）　ニッカド電池　３６
（２）　ニッケル水素電池　３７
（３）　リチウムイオン電池　３８
（４）　リチウムポリマー電池　３８
（ｃ）　燃料電池　３９
［３］　材料　４０
（ａ）　軽合金　４０
（ｂ）　エンジニアリングプラスチック　４１
（ｃ）　繊維強化プラスチック　４２

第３章　制御とは

３．１　人間とロボットを比較する　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４３
３．２　フィードフォワードとフィードバック　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４３
［１］　外乱に対しての対応の違い　４３
［２］　補正　４４
［３］　モータでのフィードバック制御　４４

第４章　ロボットの機構

４．１　機構　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４６
４．２　自由度と姿勢　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４６
４・３　ロボットの機構　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　４８
［１］　マニピュレータ　４８
［２］　移動ロボット　４８

（ａ）　車輪移動機構　４８
（ｂ）　クローラ式移動機構　４９
（ｃ）　２脚移動機構（ヒューマノイド）　４９
（１）　静歩行　４９
（２）　動歩行　５０
（３）　走行　５０
（ｄ）　４脚（多脚）移動機構　５０
（ｅ）　特殊移動機構　５０

第５章　ロボット創造に必要な総合力とは

５．１　探究心　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５１
５．２　現在のものつくりシステムの問題点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５１
５．３　いかにモチベーションを上げるか　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５３
［１］　なぜヒューマノイドロボットか　５３
［２］　ヒューマノイドロボットの社会的有用性　５３
５．４　いかに技術を活かしていくか　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５４
［１］　自己分析　５４
［２］　自己責任下での情報選択　５５
［３］　数に落とす重要性　５５
５．５　どう個性を身に付けるか　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５７
［１］　「３ない」の克服　５７
［２］　見習う（真似る）　５８
［３］　道具　５９
５．６　いかに個性をチューニングするか　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５９
［１］　失敗させる　５９
［２］　計画性　６０
［３］　ギリギリまで頑張らない　６１
［４］　遊び先行の怖さ　６２
５．７　いかに個性を確立するか　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　６３
［１］　考察は教訓を生む　６３
［２］　プレゼンテーション　６３
５．８　２足歩行ロボット製作事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　６５
［１］　デザインコンセプト　６５
（ａ）　技術コンセプト　６５
（ｂ）　キャラクターコンセプト　６６
（ｃ）　スペックプラン　６６
［２］　ハードウェア構成　６７
（ａ）　大きさ・重量　６８

（ｂ）　自由度　６８
（ｃ）　アクチュエータ　６９
（ｄ）　センサ　６９
（ｅ）　コンデンサマイクロフォン　６９
［３］　ソフトウェア構成　６９
（ａ）　Autodesk Inventor　６９
（ｂ）　MATLAB/ Simulink, Stateflow　７０
（ｃ）　visualNastran4D　７０
（ｄ）　モーションプロセッサ　７１

謝辞　・・　７２
感謝　・・　７３
参考文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　７６

１．　ロボットの創造

１．１　ロボットとは

いまでは当たり前のように用いられている「ロボット」という言葉であるが，その言葉の起源は，チェコの作家カレル･チャペック（Karel Čapek, 1890 - 1938）が 1921 年に書いた戯曲「R.U.R.（Rossum's Universal Robots = ロッサム万能ロボット）」にある（図 1･1）．この作品は，肉体的苦痛を感じず，喜怒哀楽や死に対する恐怖を欠いた，人間と外観の変わらない人造人間（ロボット）を R.U.R.社が開発し，大量生産するが，人間の労働を肩代わりしていたロボット達が反乱を起こし，人類抹殺を開始するという，いま考えるととても恐ろしい話である．Robot は，チェコ語で強制されて働くという意味をもつ Robota という言葉から，奴隷機械という意味を持たせた造語といわれている．

図 1･1　戯曲「R.U.R.」の様子とロボット

しかし，1886 年にフランスの作家ビリエ・ド・リラダン（Villiers de L'Isle-Adam，1838 - 1889）が書いた小説「未来のイブ」に「アンドロイド（android）」というロボットが登場している．これはエジソンが発明した絶世の美女ロボット「アダリー」がアンドロイドという語を作り使っていることから名付けられた．

また，ドイツの詩人ゲーテ（Goethe，1749 - 1832）が書いた戯曲「ファウスト」には，錬金術師が作り出す人造人間「ホムンクルス（Homunculus）」が登場する．さらに，イギリスの小説家メアリ・シェリー（Mary Shelley，1797 - 1851）が書いた小説「フランケンシュタイン」にも，フランケンシュタイン博士が生み出した怪物のような人造人間が登場する．

このようにチャペックがロボットという言葉を作り出す以前にも，ロボットの概念や形はできあがっていた．これらの話には全て，人間に害を加えたり人間の存在を脅かしたりと，ロボットに対して否定的な感情が多く見られる．なぜなら，この背景には，当時の社会的，宗教的な影響が強く存在するからである．

こういった作品に影響されてか，ヨーロッパやアメリカでは，特に人型ロボットに対して「ロボットは嫌い」という感情を抱く人が多くいる．しかし，いまではその感情も大分薄れてきており，世界各地でロボットの研究が行われるようになってきている．

しかしいまでは，1942 年にアメリカの作家アイザック・アジモフ（Isaac Asimov，1920 - 1992）が「われはロボット」で書いたロボット工学三原則（ロボット・人工知能の倫理規則）が，現在のロボットを定義つけているといっても良いであろう（表 1･1）．

表 1･1　アイザック・アシモフのロボット工学三原則

第 1 条	ロボットは人間に危害を加えてはならない．また，人間に危害が及ぶのを見逃してはならない．
第 2 条	ロボットは人間から与えられた命令に従わなければならない．ただし，与えられた命令が第 1 条に反する場合は，この限りではない．
第 3 条	ロボットは第 1 条および第 2 条に反しない限り自身を守らなければならない．

一方，日本ではロボットというと，やはりアニメの影響が強く，中でも手塚治虫（1928 - 1989）の「鉄腕アトム（図 1･2（a））」がそのイメージを日本人に植え付けた．また，遠隔操縦の「鉄人 28 号（図 1･2（b））」（横山光輝），人間搭乗型ロボットの「マジンガーZ（図 1･2（c））」（永井豪），「機動戦士ガンダム（図 1･2（d））」などの登場により，ロボットのイメージはさらに広がることとなった．

このように日本ではロボットというと，ヒーローとか困ったときに助けてくれるというように，ヨーロッパやアメリカとは真逆の感情を抱いている．どちらが良いか悪いかは一概に判断できないが，日本をロボット大国に伸し上げた背景にはこういった国民感情の違いが大きかったと思われる．

（a）鉄腕アトム

（b）鉄人 28 号

（c）マジンガーZ

（d）機動戦士ガンダム

図 1･2　日本の代表的なロボットアニメ

しかしながら，ロボットとは何か?という「定義」に関しては，あいまいなのが現状である．(*) なぜなら，ロボットは人工知能に代表されるように，より知的になればなるほど「人間」との係わり（感情）が重要になり，「ロボットとは何か? ＝ 人間とは何か?」という問題に変わってくるから

である．これは工学の世界だけで定義できる問題ではない．

ロボットは，語源も奴隷機械や人造人間といった形や概念が，ヒトをもとにしている．また，最近ではヒューマノイド型（人型）ロボットが話題を呼んでいる．ロボットと人間の関係は，これからますます深くなっていくだろう．本書を読んでロボットに興味を抱かれた読者の皆さんも，ロボットとは何か?と同時に，人間とは何か?という至上問題を考えてみるのも良いかもしれない．

(*)　しかし産業用ロボット（industrial robot）に関しては，JIS 用語で「自動制御によるマニピュレーション機能又は移動機能をもち，各種の作業をプログラムによって実行できる，産業に使用される機械」と定義されている．

１．２　ロボットの歴史

［１］　自動人形・からくり人形

ロボットの概念としては，紀元前 8 世紀頃に古代ギリシャのホメロスによって書かれた「イーリアス」に黄金のロボットが登場する．その後も多くのロボットが様々な話に登場するが，多くは空想の世界のものであった．

18 世紀頃になると，いままで自動装置や時計に注がれていた機械工作や加工の技術が応用され，自動人形（オートマタ）として，いまでいうロボットの玩具が作られ始めた．中でも，フランスのボーカンソンが作ったアヒルの自動人形は，自らえさをついばみ，排泄し，鳴き声をあげたりすることができた（図 1･3）．また，スイスのジャケドロスは絵を描いたり，オルガンを演奏する自動人形を製作したりと，かなり精巧に人間のような振る舞いを実現していた．

(a) ボーカンソンのアヒル　　(b) ジャケドロスのオルガンを演奏する自動人形

図 1･3　自動人形

<参照 HP: http://www.suelab.nuem.nagoya-u.ac.jp/~suematsu/automata/automata.html>

同じ頃，日本にもからくり人形が多く登場する．細川頼直の茶運び人形や五段返し，「東洋のエジソン」と呼ばれ，現在の㈱東芝の創始者でもある田中久重の弓曳童子はとても有名である（図 1･4）．

19 世紀になると，前述したような「フランケンシュタイン」，「ファウスト」，「未来のイブ」などが発表される．そして，20 世紀になるとカレル・チャペックの「R.U.R.」でロボットという言葉が生まれ，アイザック・アシモフによってロボット 3 原則が生まれるなど，SF 小説や文学の世界でロボットのイメージは膨らんでいった．

（a）茶運び人形　　（b）五段返し　　（c）弓曳童子

図 1･4　日本のからくり人形

＜（a）（b）参照 HP: http://www.karakurijuku.org/index.html ,（c）参照 HP: http://www.tcmit.org/collection/top.html>

［２］　産業用ロボット

20 世紀に入り，科学技術が急速に発展し，NC（数値制御）工作機械が 1952 年に開発される．これを期に現在，我々が想像するようなロボットが多く開発されるようになる．産業用ロボットが製品になったのは 1962 年で，アメリカのユニメーション社が「ユニメート」を，AMF 社が「バサトラン」を発表する．日本では川崎重工業が 1969 年に「川崎ユニメート 2000」を発表し，これを期に産業用ロボットの普及が始まっていった（図 1･5）．

図 1･5　日本初の産業用ロボット「川崎ユニメート」（川崎重工業）

<参照 HP: http://www.khi.co.jp/overview/history.html>

［３］　２足歩行ロボット

産業用ロボットが普及する一方で，1966 年に早稲田大学が 2 足歩行ロボットの研究を始め，1973 年に世界初のヒューマノイドロボット「WABOT-1」を開発した．一方，ホンダも 1986 年に 2 足歩行ロボットの研究をはじめ，1996 年に「P2」，翌年に「P3」，そして 2000 年には「ASIMO」を開発した．ホンダは短い期間に驚異的な技術力で，一躍世界のトップへと成長して行った．

20 世紀から 21 世紀へと時代が移り変わる頃，経済産業省が「HRP」，ソニーが「SDR」を発表するなど，続々とヒューマノイドロボットが開発されるようになり，現在，注目を浴びる分野となっている．また，2 足歩行ロボットだけでなく，エンターテインメントや福祉，医療，生活の分野にまでロボット技術は幅を広げ，今後の活躍が期待されている．

１．３　ロボットの種類

ロボットは，その形状や用途によって様々な種類に分けられるが，本書では以下のように分類する．

［１］　多目的ロボット

多目的ロボットは，人間と共存することを目指したロボットである．人間と話をしたり，手伝いをしたり，かなり人間に近い働きをする．人間と共に生活するためには，人間の姿に似ている方がコミュニケーションを取りやすいため，ヒューマノイド型である場合が多い．

人間とぶつからずに狭いところを通り抜ける，階段を上る，ドアを開ける，身振り手振りなど感性レベルのコミュニケーションをとるなど，その身体能力や知能は日を追うごとに進歩している．

（ａ）　ＡＳＩＭＯ（ホンダ，図 1･6）

ASIMO は「Advanced Step in Innovative Mobility」の略で次代への一歩を踏み出した革新的モビリティという意味が込められ，20 世紀から 21 世紀に掛けて，人間環境の中でロボットが共存していくということを目指したロボットである．1986 年に脚ロボットでの歩行を実現し（この頃には 1 歩に 5 秒かかっていた），その 10 年後には世界初の人間型自律 2 足歩行ロボット P2 が発表され，世界中の人達の度肝を抜いた．

ASIMO は今も進化を続け，現在では時速 6km での走行や旋回走行も実現している．また，認識能力も進化し，自動で受付案内やワゴンを使ってデリバリー作業をするなど，人間の動きに合わせた作業を行うことも可能で，コミュニケーション能力がより強化されている．ASIMO は今後，ホンダのオフィス内での運用を始めるなど，実社会環境に適応するロボットとして，期待が集められている．

また ASIMO は，ツインリンクもてぎファンファンラボや日本科学未来館で会うことができる．

図 1･6　ASIMO

（ｂ）　ＱＲＩＯ（ソニー，図 1･7）

QRIO はソニーが開発したエンターテインメントロボットで，Quest for Curiosity（好奇心の追求）という意味が込められている．全身で滑らかにダンスを踊ったり，豊かに感情を表現したりすることができるなど，人間の友達，パートナーとなることを目指したロボットである．

QRIO は制御系や電源系を搭載した自立型人型ロボットして，世界で始めて走行を実現したロボットでもある．また，転倒しても受け身をとったり，人間とコミュニケーションが可能であったり

と，人間に近いパフォーマンスも実現している．

また，ソニーは日本ユネスコ協会連盟と共同で，科学技術体験教室「QRIO サイエンスプログラム」を実施し，青少年育成のための教育活動も行っている．これは子供達の科学に対する好奇心や探究心を育むことを目的とした国際教育プログラムで，QRIO はサイエンスメッセンジャーとして世界各地で活躍している．

図 1･7　QRIO

（ｃ）　ＨＲＰ（産業技術総合研究所，図 1･8）

HRPは「人間協調・共存型ロボットシステムの研究開発」（Humanoid Robotics Project）で開発されたロボットで，これらは 1998 年から 5 年に渡り，経済産業省の技術開発プロジェクトの一環として，産業技術総合研究所より開発された人間型ロボットの最終成果機である．

HRP-1 は，P3（ホンダ）を使って研究を進めながら，全身制御のソフトウェアや運動系シミュレータ，操作用コックピット，視覚認識システムなどを開発し，ブルドーザなど主に産業用車両の運転を実現した．

HRP-2 は，HRP-1 に比べ，歩行やシステムが安定し，悪路での歩行や，「起きあがり」と「寝転び」の動作が可能となった．「起きあがり」と「寝転び」により，人間との共同作業時に，不意のトラブルでロボットが転倒しても，自力で立ち上がって作業を続けることを可能としている．

さらに HRP-3 は，HRP-2 と比べ，新たに防塵・防滴の機能を実現している．滑りやすい状態の路面上の歩行や，作業機能の拡大も同時に実現している．また，自律・遠隔ハイブリッド型全身操作技術による作業機能の拡大と，操作に適した遠隔操作コックピットも開発している．

（a）HRP-1

（b）HRP-2

（c）HRP-3

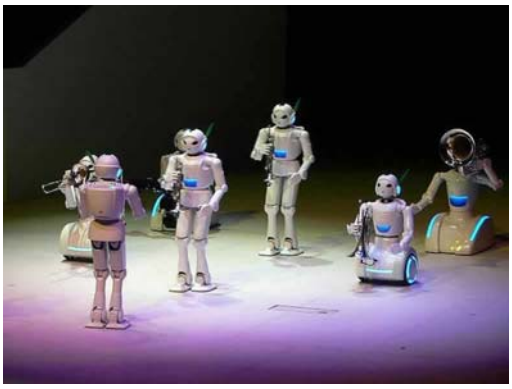
図 1.8　HRP で開発されたロボット

（ｄ）　ＣＯＮＣＥＲＯ（トヨタ，図 1･9）

CONCERO は，愛知万博（2005 年 3 月 25 日～9 月 25 日開催）で披露された，トヨタグループが開発したパートナーロボット 8 台で編成されるバンドの名前である．CONCERO とは，「CONCERT（演奏)」と「ROBOT（ロボット)」から命名されたロボットである．

8 台のうち 3 台は 2 足歩行型ロボットで，トランペットの演奏を担当する．残りの 5 台は車輪型で，スムーズに走り回ることができる．5 台のうち 1 台が，指揮者となる DJ ロボットで，ラップもできる．他にも，チューバやトロンボーン，太鼓類など，実に本格的である．

また CONCERO は，ロボットが本物の吹奏楽器を人口唇と指を使って演奏している．指の動きを制御することは，機械的な動きの遅れを加味して作動させれば良いが，音を出すための制御は大変難しく，これらの制御を上手く行った演奏とパレードは圧巻である．



（a）CONCERO

（b）i-unit

（c）i-foot

（d）ワイヤ駆動型ロボット

図 1･9　トヨタは愛知万博で CONCERO 以外にも様々なロボットを開発した

［２］　生活コミュニケーションロボット（図 1･10）

生活コミュニケーションロボットとは，主に人間が話しかけたり，触れたりすることでロボットが喜怒哀楽を表現し，コミュニケーションをとることができるロボットである．また，ロボット同士でコミュニケーションをとり，仕事を行うロボットもある．

PaPeRo や ifbot は，質問すると答えたり，逆に質問されたりなど人間との高度なコミュニケーションが可能である．また番竜のように，コミュニケーションだけでなく，家の警備・監視などが可能なロボットや，AIBO やパロのようにペット感覚で人々に癒しを与えるものなど，家庭に入り込んだパートナーロボットが主である．

さらに，親子ロボビー，ロボット同士で漫才をする wakamaru&ロボビーなどのように，ロボット

とロボットがコミュニケーションをとり，人々の生活を支えていくロボットも，最近では多く開発され始めている．

これらのロボットの多くは，コミュニケーションをとるために，声や音などを聞き取る聴覚の働きをする音声認識，ロボットの置かれている環境や人間の顔などを認識する視覚にあたる画像認識，撫でられたり叩かれたりといった行動を認識する人間の触覚にあたるセンサなど人間の 5 感に近い機能を備えている．

（a）PaPeRo（NEC）

（b）ifbot（ビジネスデザイン研究所）

（c）番竜（テムザック）

（d）AIBO（ソニー）

（e）パロ（産業総合技術研究所）

（f）ロボビー（ATR　知能ロボティクス研究所）

図 1･10　生活コミュニケーションロボット

［3］　接客ロボット（図 1･11）

接客ロボットは，人間そっくりな外観をもち，人とコミュニケーションをとり，人の代わりに接客するロボットである．

愛知万博で披露されたアクトロイドは，日本語，中国語，韓国語，英語の 4 ヶ国語を操り，来場

者の接客を見事にこなした．また，SAYA は話しかけた内容によって表情を変化させ，人間との感性豊かなコミュニケーションを実現している．

（a）アクトロイド（ココロ・アドバンスト・メディア）　（b）SAYA（東京理科大学）

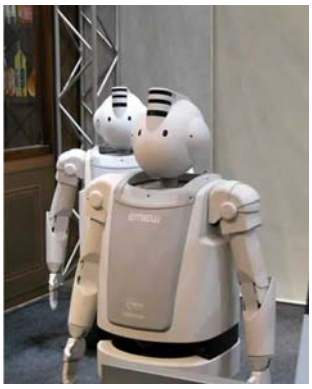
図 1･11　接客ロボット

［４］　作業支援ロボット（図 1･12）

作業支援ロボットは，オフィスや商業施設など，人がいる環境で，案内，搬送などの作業支援を行うサービスロボットである．形状は作業効率を優先しているため，2 足歩行型より車輪型や 4 足歩行型が主で，作業用途に適した形を成しているロボットが多い．しかしながら，多くのロボットのデザインはヒューマノイド型を成しており，違和感のなく人間社会に溶け込むことが可能となっている．

wakamaru（図 1･12（a））は，オーナーやその家族などの顔を認識し，生活シーンに合わせた話題を自分からも話しかけるなど，自然で豊かなコミュニケーションが可能である．また，マンションやビル内での郵便物や小荷物の運搬役として，またレストランのウエイターやウエイトレスの代わりとして働くことを目的とするエミュー（図 1･12（b）），案内や誘導，搬送，巡回や見回りなどを行う Enon（図 1･12（c））などは，日常業務を支援するお手伝いさんのようなロボットである．

また，タッチパネルで指示することにより，病院内で，X 線フィルム，検体，薬などを人に代わって運搬する HOSPI（図 1･12（d））は，すでに現場で実用化されている．



（a）wakamaru（三菱重工）（b）エミュー（日立製作所）（c）Enon（富士通フロンテック）

（d）スマートパル（安川電機）　（e）HOSPI（松下電工）　（f）鉄犬（電気通信大学）

図 1･12　作業支援ロボット

［５］　掃除ロボット（図 1･13）

掃除ロボットとは，障害物センサや段差センサを用いて，自動的に掃除エリアを認識し，勝手に掃除を完了させてくれるロボットである．掃除ロボットには，屋外用と屋内用がある．

屋外用としては，ロボットの進行方向の障害物を検出するためのレーザーレーダ，動いた角度で方向を検出するジャイロセンサなどを搭載しているスイッピーやロボハイターRS1 などがある．どちらも愛知万博で実証実験が行われ，実用化に向けて開発が進められている．

屋内用としては，主に家庭内で使用するもので，障害物を感知し進路を修正するための高感度タッチセンサ，階段等の段差を回避するための段差センサなどを用いているルンバがある．ルンバは全世界で販売台数 100 万台を突破する人気商品となった．

（a）スイッピー（松下電工）　（b）スバル　ロボハイターRS1（富士重工業）

（c）ルンバ（iRobot）

図 1･13　掃除ロボット

［６］　警備ロボット（図 1･14）

警備ロボットは，警備員のかわりに夜間，ビルなどの設備を警備して回り，万が一，侵入者を見つけても撃退できるような装備が搭載されているロボットである．警備ロボットは，屋内外問わず自律走行が可能であり，かつ不審者，不審物の発見や高速での移動が可能であるなど，高度な車体の制御・センシング技術を備えている．

ALSOK の警備ロボットガードロボ C4 は，実際に販売も開始され，実用化され始めている．セコムロボット X は，高速で不審者を追い込み，撃退する機能が備わっている．また，愛知万博でも ALSOK Guard Robo i やムジローリグリオの実証実験が行われている．

(a) ガードロボ C4（ALSOK）

(b) セコムロボット X（セコム）

(c) ALSOK Guard Robo i（ALSOK）

(d) ムジロー（テムザック）

図 1･14　警備ロボット

［７］　レスキュー支援ロボット（図 1･15）

レスキュー支援ロボットは，災害現場などで人間の数倍力が必要な作業を行ったり，救助隊員が近づけないような危険な場所で，作業の代行を行ったりするロボットである．

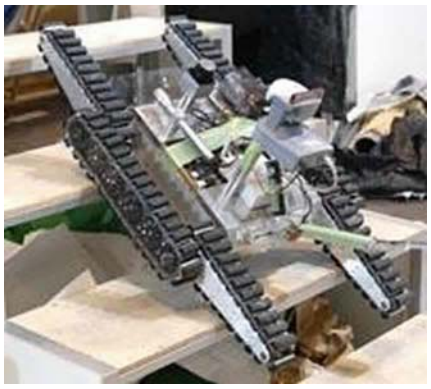
開閉グリッパをもった 8 自由度の油圧駆動アーム 2 本を同時に使って作業を行い，片手で 500kg，両手で 1t もの物体を持ち上げることができる災害救助ロボット T-52 援竜・改や，金属探知機と電磁波センサを備え，金属製の地雷だけではなく従来発見できなかったプラスチック製の地雷も検地できる COMET-Ⅲがある．

また，左右のキャタピラに，それぞれ独立して上下に動作する「前脚」「後脚」を装備していて，不整地走行能力に優れている桐蔭横浜大学のレスキューロボットは，ロボカップ世界大会のレスキューロボット部門で 2 年連続優勝するなど，世界でもトップレベルの技術を誇っている．桐蔭横浜大学のレスキューロボットは，2004 年に起こった新潟県中越地震の際に，防水加工などを施した改

良版が投入されており，日本で初めて災害現場に投入されたロボットでもある．

（a）T-52 援竜・改（テムザック）

（b）COMET-Ⅲ（千葉大学）



（c）桐蔭横浜大学のレスキューロボット

図 1･15　レスキュー支援ロボット

［８］　福祉ロボット（図 1･16）

福祉ロボットは，主に重度障害者やお年寄りなどの生活を補助するためのロボットである．自立型ロボットは現在少なく，介護ではなく障害者自身の操作によって自立を支えるために使われていることが大半である．

移動が困難な障害者をパネルで行き先を指定することにより，目的地に連れて行ってくれる車椅子型の Tao Aicle（図 1･16（a））や，手の代わりにスプーンとフォークの付いたアームで口まで食べ物を持っていく日本初の食事支援ロボットであるマイスプーン（図 1･16（b)），装着した人間の運動意思を読み取り次の動作を予測，そしてモータで動作を補助することにより低下した筋力を補うことができるパワーアシストスーツ HAL（図 1･16（c））など，能力の低下した身体機能の補助をするものが多い．

（a）Tao Aicle（アイシン精機・富士通・産業技術総合研究所）

（b）マイスプーン（セコム）

（c）HAL（筑波大学）

図 1･16　福祉ロボット

［９］　医療ロボット（図 1･17）

医療ロボットは，医療の現場で使用されるロボットで，手術ロボット，介護ロボット，超小型ロボットがある．これらのロボットは，ナビゲーションや治療を目的とするなど多種多様である．医療ロボットは，他の種類のロボットと違い，安全性が極めて重要になる．

現在では，「da Vinci」や「ROBODOC」といった手術用ロボットが実際の治療に使われ始め，医療ロボットも実用化に向け動き始めている．

（a）Da Vinch（Intuitive Surgical 社）

（b）手術支援ロボット ROBODOC
（医誠会病院ロボット手術センター，児島中央病院ロボット手術センター）

図 1･17　医療ロボット

［１０］　玩具ロボット（図 1･18）

玩具ロボットは，見たり，触れたり，話しかけたりしながら楽しむことを目的としたロボットである．中には，様々なセンシング技術や音声認識といった高度な技術を用い，人間と触れ合うことで成長するロボットも存在する.

玩具ロボットとしては現在,バンダイが進めるドラえもんを 2010 年までに作るというプロジェクトの一環として発売されたドラえもん・ザ・ロボットがある．ドラえもん・ザ・ロボットは，約 750 語の言葉を話し，人間とのコミュニケーション能力を備えている．この誰もが思い描く夢の実現のためにドラえもんは現在も開発が進められている.また,学研から発売されている大人の科学では,からくり人形やメカモをはじめとするロボットから，蓄音機やラジオといった昔懐かしいものを作るキットが発売されている.

ロボットには，高額というイメージがあるが，より多くの人に触れてもらえるように動きを単純にし，比較的安価なロボットが多く存在する.そういった意味では，玩具ロボットは一般の人達にとって一番身近な存在であるといえるだろう.

(a) ドラえもん・ザ・ロボット（バンダイ）

(b) ワンダーボーグ（バンダイ）

(c) i-dog（セガトイズ）

(d) からくり人形（学研）

(e) CAM-8

図 1･18　玩具ロボット

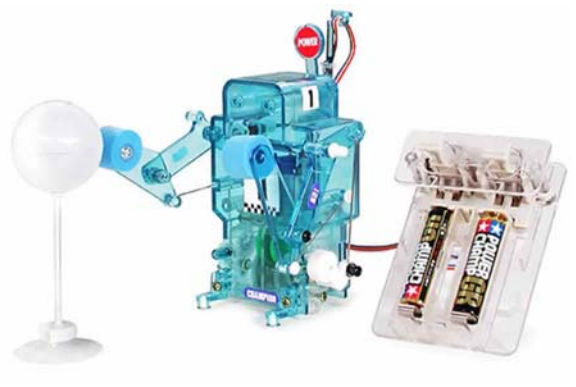
［１１］　キッドロボット（図 1･19）

ロボットキッドとは，ねじ回しなどの一般的な工具とパソコンさえあれば自分で作って動かすことができるキッドである．いまでは学生達のロボット教育用として，また低価格化が進み，ホビー用として購入する人も増えている.

17 自由度をもち，人間に近い動きができる KHR-1 は教示機能を使用することで，短時間でモーション作成を行うことが可能となっている．また，タミヤのロボット工作キッドやレゴマインドス

トームなど，子供から大人まで楽しめるロボットキッドも多く販売されている．

また，KHR-1 と同じ 17 自由度のホビーロボットとして MANOI を販売している京商は，MANOI を用いたアスリート競技「KYOSHO アスレチクスヒューマノイドカップ」を開催する予定で，ホビーロボット市場をイベントで盛り上げていくなど，キッドロボットの分野は急成長を遂げている．



（a）KHR-1（近藤科学）（b）ROBONOVA-1（ハイテックマルチプレックスジャパン）

（c）ボクシングファイター（タミヤ）

（d）レゴマインドストーム（レゴ）　　（e）MANOI（京商）

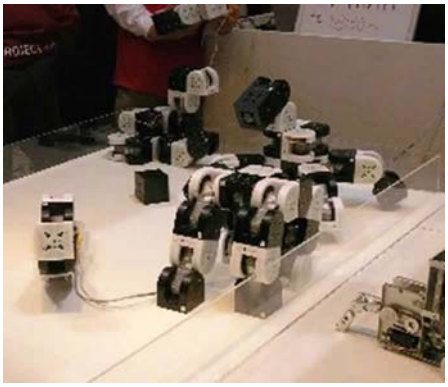
図 1･19　キッドロボット

［１２］　特殊ロボット（図 1･20）

ここでは，これまで紹介したロボットとは異なった特殊な目的，機能を持つロボットを紹介する．

M-TRANは，ばね，磁石，形状記憶合金を組み込んだモジュールを用いることにより，合体・変形というまるでアニメのロボットであるかのような能力を持つ．また，Paletteは，洋服や宝飾品を美しく見せるためバレリーナやスーパーモデルの動きを取り込んだマネキンロボットである．1cm^3 の立方体に収まることのできるギネスブックにも認定された世界最小自立走行ロボットであるムッシュ，世界最小最軽量のフライングロボットであるμFR Ⅱ と極小ロボットも開発されている．

さらに，自転車を上手に操るムラタセイサク君，ガンダムのようなロボットの搭乗型 2 足歩行ロボットのランドウォーカー，タンクに入った水を沸騰させることにより，水蒸気で空を飛び，鉄腕アトムを彷彿とさせるとび丸君（霧隠才蔵）など，夢のある様々なロボットが開発されている．



（a）M-TRAN（産業技術総合研究所）

（b）Palette（日本 SGI）

（c）ムッシュ（セイコーエプソン）

（d）μFR Ⅱ（セイコーエプソン）

（e）ムラタセイサク君（村田製作所）（f）ランドウォーカー（榊原機械株式会社）

（g）とび丸君（日本文理大）

図 1･20　特殊ロボット

１．４　ロボットの創造

［１］　夢をもつ

上述してきたように，日本では多くの種類のロボットが研究・開発されている．ロボットを開発している技術者は，皆，大きな夢をもっている．鉄腕アトムを実現しよう，ドラえもんを作ろう，いまやそのような夢を語っても目をひそめる人は少なくなったように思う．しかし，一昔前まではそのようなことは夢のまた夢で，周りの目は厳しかった．(*)

（*）鉄腕アトムの誕生日とされる 2003 年 4 月 7 日には，横浜で ROBODEX2003 というロボットの大博覧会が開催され，多くのロボットで賑わいを見せた．このように鉄腕アトムというアニメが，現在のロボット技術者にとって 1 つの大きな原動力になっているのは間違いない．（図 1･21）

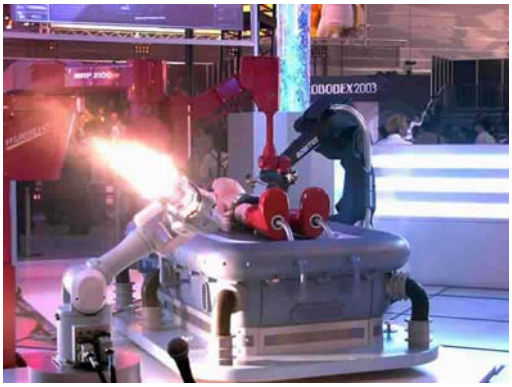


図 2･21　鉄腕アトムの誕生日に開催された ROBODEX2003

しかし，ASIMO の誕生以来，アニメの世界の話だったヒューマノイドロボット（鉄腕アトム）が現実味を帯び始め，多くの人々に勇気を与えた．本書はロボット入門ということで，主にロボットに興味を持った学生諸君が本書を手にしていると思われる．筆者が学生達と触れ合ってきて，最近特に思うことは，最近の学生は夢をもっていないということである．読者の皆さんはどうであろうか?

多くの学生は高校や大学で多くの技術を学ぶが，その技術が現場でどのように活かされているのかを知らない．そのため，生きた技術というのが備わっていないのである．自分達が行ったことが，どう現場に活かされ，役立っているのかを実感できない限り，常にモチベーションを高く保つことは難しい．

現在の子供達は，答えが用意されている予定調和（脚注：世界の秩序は，あらかじめ神によって定められているとする説）な問題を解くことに慣れてしまっている．悩みに悩んだ挙句，出てきた答えというのが予定されたものでは面白みがない．悩みに悩んだ挙句，なぜこうなったのか?という好奇心や探究心が出てこなければ，モチベーションを高く保つことはできない．

［２］　ものつくり

高校や大学は，ものを作るためにはどうしたら良いかという技術を教えてくれるシーズ（seeds）が詰まった場である．シーズというのは基本的にニーズ（needs）があって初めて活かされる．闇雲に技術ばかりを集めても，それをどのように社会に活かしていくかを定めておかないと，その技術はただの宝の持ち腐れになってしまう．素晴らしい技術を駆使したものが，素晴らしいものかといわれれば，そうともいえない．どんなに素晴らしい技術を用いても，世間のニーズとマッチしなければそれは駄作になる．

だから，夢をもてない学生の方達には，高校や大学で技術を学ぶより先にニーズを知って欲しいと思う．ニーズは実際にものを作り，ものに触れ，ものを使って初めて見えてくる．本書ではその事例として，ヒューマノイドロボットによるものつくりを挙げている．

詳しくは第 5 章で後述しているが，ヒューマノイドロボットには夢を与え，学校では教えてくれない生きた技術を習得する要素がたくさん詰まっている．本書の事例では，学生達は自らの力で 2 足歩行ロボット競技会 ROBO-ONE 出場を目指し，先生達の力を借りることなく大きな成果を残した（図 1･22）．その成果というのは，結果や技術はもちろんのこと，企画力，感性，チームワーク，プレゼンテーションなど技術者としての総合力である．

ものつくりは好奇心や探究心を育むには最適な教育である．決して教科書や参考書にはない，生きた技術をものつくりは与えてくれるのである．

図 1･22　第 8 回 ROBO-ONE では決勝トーナメントに進出したナベ☆ケン

２．ロボットの構造

２．１　メカトロニクス

メカトロニクス（mechatronics）とは，機械（mechanism）と電子（electronics）が融合して作られた和製英語である．機械と電子が，それぞれの特徴を活かし，互いの弱点を補うのがメカトロニクスである．このメカトロニクス技術により，ロボットは構成されている．

ロボットは大きく分けると，ハードウェアとソフトウェアに分けることができる．ハードウェア（hardware）は，JIS 用語で「情報処理システムの物理的な構成要素の全体又は一部分」とされ，ソフトウェア（software）は「情報処理システムのプログラム，手続き，規則及び関連文書の全体又は一部分」とされている．つまり，ハードウェアは物理的なもので，ソフトウェアは知的なものということになる．人間でいうと，肉体と精神のようなイメージである．肉体に魂を吹き込むことで人間が存在するように，ロボットもハードウェアにソフトウェアを組み込まなければ動作しない（図 2･1）．

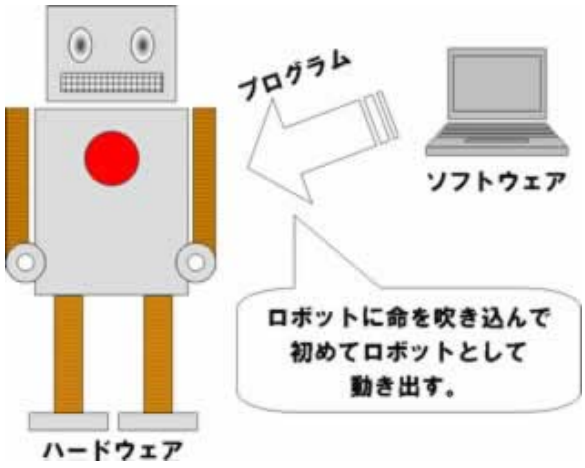


図 2･1　ハードウェアとソフトウェア

ロボットのハードウェアは，「メカニズム」「アクチュエータ」「動力源」「センサ」「コンピュータ装置」で構成され，ソフトウェアはこれらのハードウェア要素を結びつける役目をする．

- メカニズム（mechanism）：動きを可能にする機構
- アクチュエータ（actuator）：機械を動かす駆動部
- 動力源（buttery）：各種装置を動かすためのエネルギー源
- センサ（sensor）：機械の動きや外界の情報を計測するセンサ
- コンピュータ装置（computer）：動きを計算，制御，判断する部分

２．２　ロボットにおけるメカトロニクスの技術

［１］　メカニズム

メカニズムとは，機械の機構とその機構による運動の伝達に関するものである．図 2･2 のように人間の腕を実現しようとするとき，ロボットには腰，肩，上腕，肘，前腕，手首，手，指などが行う運動を可能にする機構を備えなければならない．このように各構成要素を組み合わせ，1 つのシステムを構成する技術がメカニズム技術である．

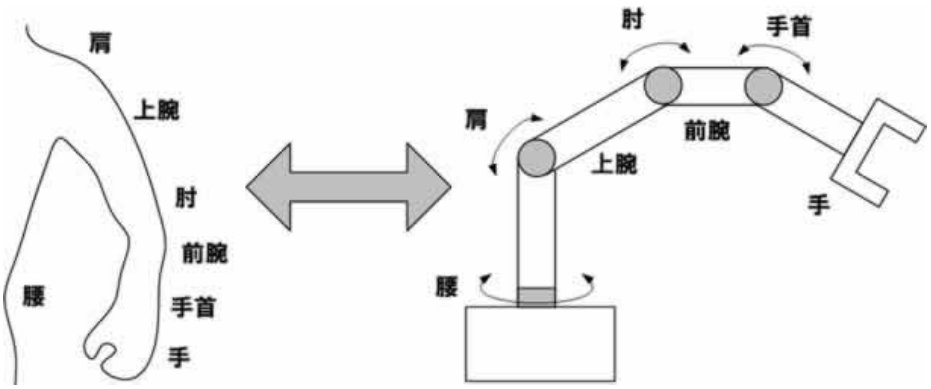


図 2･2　人間の腕とロボットアームの構成の対比

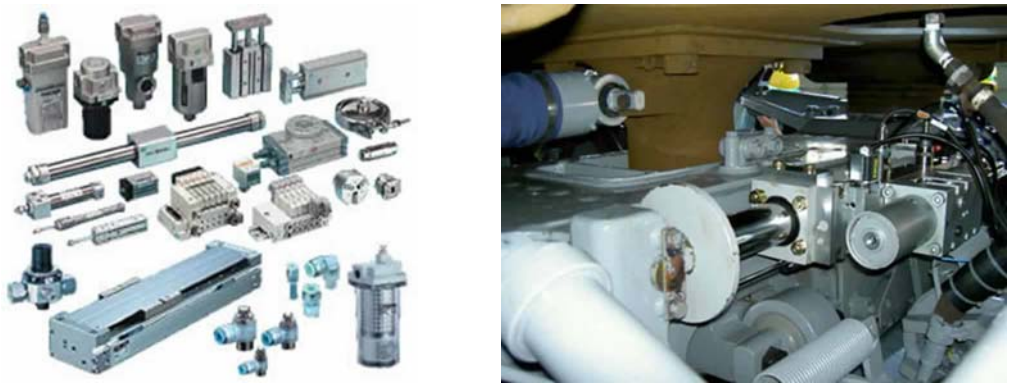
［２］　アクチュエータ

図 2･2 のようなロボットアームを構成しても，動作させるためには駆動源が必要となる．この駆動源がアクチュエータであり，腰，肩，肘，手首といった関節部分がそれにあたる．

アクチュエータには様々な種類が存在し，図 2･3 のような電力を利用するモータ（ステッピングモータ，直流モータ，交流モータ），図 2･4 のような空気圧，油圧を利用するもの，図 2･5 のようにピエゾ素子や超音波，人口筋肉といった特殊型など様々である．それぞれのアクチュエータには，大きさ，重量，制御性など，その性能は一長一短で，用途によって使い分ける必要がある．

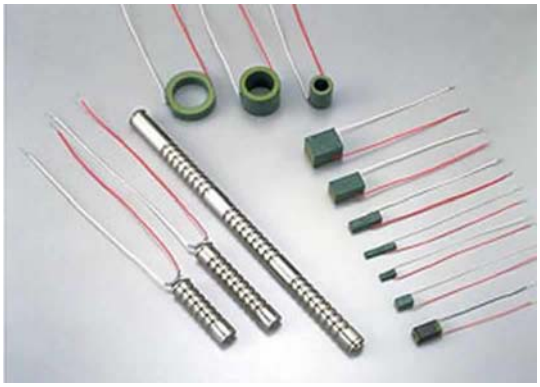
（a）ステッピングモータ　　（b）直流モータ　　（c）交流モータ

図 2･3　電力を利用するモータ

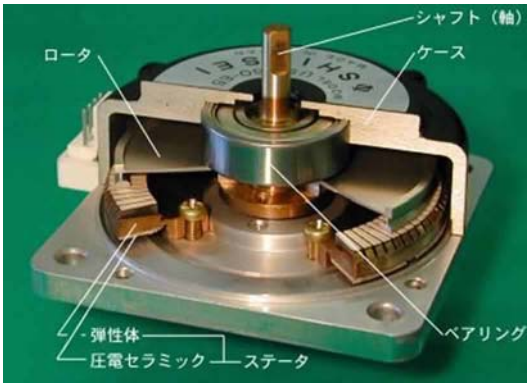


（a）空気圧アクチュエータ　　（b）油圧アクチュエータ

図 2･4　空気圧・油圧式のアクチュエータ



(a) 圧電アクチュエータ



(b) 超音波モータ

(c) ラバーアクチュエータ

図 2･5　特殊型のアクチュエータ

［３］　動力源

ロボットのメカニズムを動作させるアクチュエータも,動力源となる電源がなければ動作しない.動力源については，ロボットの用途や使用するアクチュエータの種類によって使い分ける必要が出てくる．産業用ロボットのような工場内で使うのか，屋外で使うのか，人間が立ち入ることができないような特定領域で作業するのかによって，使用する動力源は変わってくる（表 2･1）.

表 2.1　移動ロボットの動力源（ロボット工学ハンドブックより）

ロボットの形態	応用領域	直接駆動源	動力源
移動マニピュレータ	工場内	モータ・油圧	電源ケーブル
自動搬送ロボット	同	モータ	電源ケーブル
建設作業用ロボット	屋外	油圧	エンジン
救助ロボット	屋内外	モータ・油空圧	バッテリ
小型移動ロボット	屋内	モータ	バッテリ
		空気圧シリンダ	エアタンク
マイクロロボット	特定領域	特殊アクチュエータ	マイクロ波
ヒューマノイド	一般	モータ	バッテリ

［４］　センサ

センサは，ロボットの動きをとらえるもので，計測しようとする物理量や測定原理によって多種多様である．変位，速度，加速度，力，角度，角速度，角加速度，距離などの物理量を電圧に変換

するものである（図 2･5）．人間でいう感覚器に相当するのがセンサである．

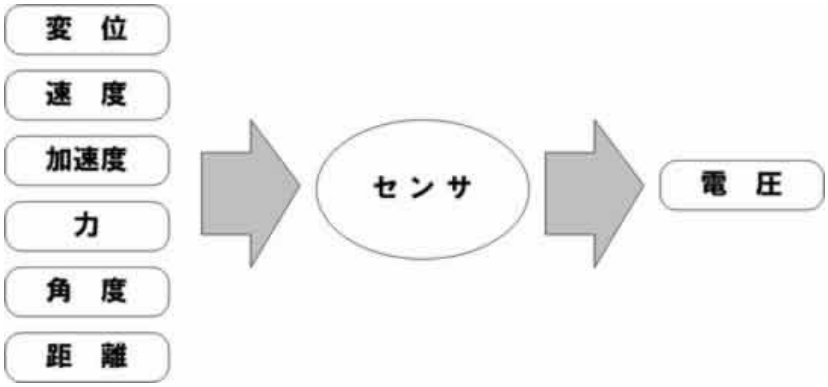


図 2･5　センサの役割

［５］　コンピュータ装置

センサでとらえられた機械の動きは，その動きに比例する連続的な電圧で与えられる．このような連続的な信号はアナログ信号と呼ばれ，このままコンピュータに取り込めない．コンピュータ内で扱われる信号はディジタル信号であり，センサからのアナログ信号は A-D 変換されてから，コンピュータに取り込まれる．

また，逆にコンピュータ内の信号をアナログ信号に変換する場合には，D-A 変換器を介する必要がある．図 2･6 にコンピュータとセンサ，アクチュエータの接続の様子を示した．

コンピュータ内部ではセンサからの信号をもとに，プログラム言語を用いてプログラムが作られる．プログラム言語はアセンブラ，C 言語などが一般的であるが，そのロボットや工作機械専用の言語も存在する．

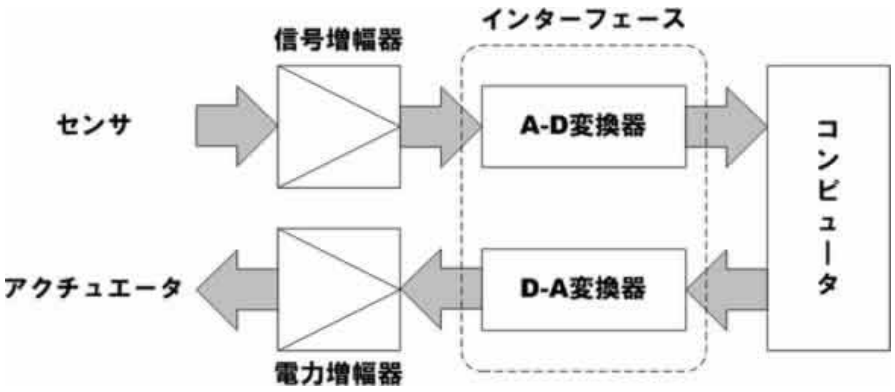


図 2･6　コンピュータとセンサ，アクチュエータの接続

［６］　制御

いままで説明してきた技術は，主にハードウェアに関わるものであるが，制御は主にソフトウェアの技術である．しかしソフトウェアといっても，コンピュータ言語やその管理の技術ではなく，センサからの信号をもとにアクチュエータや機構をいかにうまく動作させるかを考え，そのためのプログラムをつくる技術が制御技術なのである（図 2･7）．

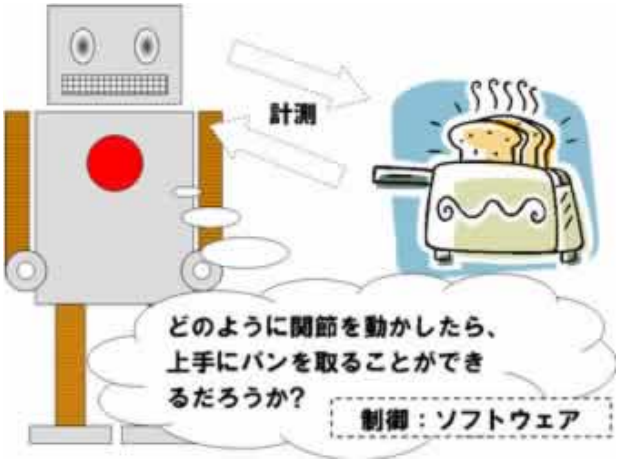


図 2･7　制御の技術

２．３　ロボットの開発システム

［１］　ロボット開発の流れ

初めてロボットを開発するときの手順としては，図 2･8 のような手順を踏むのが普通である．しかし，設計から組立までの機械加工の工程は，非常にコストがかかり，何度も試行錯誤すると，個人製作の場合は金銭的に製作が困難になる．また，機械加工の工程がうまくいっても，実際に動作させたときに，強度や機構に問題があると，正常に動作せず，再度設計し直しとなり，また莫大な資金を投じなければならなくなる．

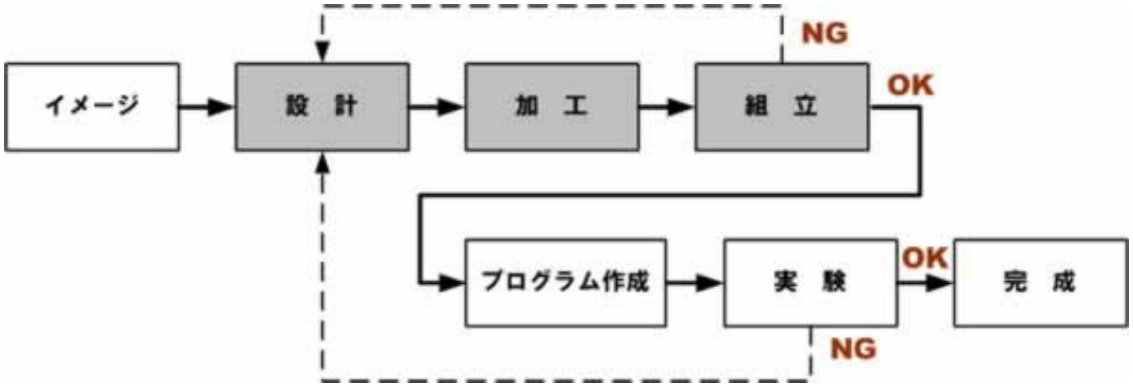


図 2･8　初心者に多いロボット開発手順

比較的構造が簡単で，アクチュエータの数も少なければ，多少のハードウェアの欠点も，センサ処理やプログラム処理といったソフトウェア技術でカバーすることは可能である．しかし，歩行ロボットのようにアクチュエータの数が多くなり，メカニズムが複雑になると，ハードウェアのがたつきは致命的な欠陥となり，もはやソフトウェア処理ではカバーしきれなくなる．

そこで，より効率的な開発方法としてモデルベース開発（Model Base Development）という開発法がある．これは，CAD 上で設計したものを検証し，不具合があれば再度設計して検証するという試行錯誤をコンピュータ上で行い，コンピュータ上のモデルでソフトウェアの開発を進めていく開発法である（図 2･9）．

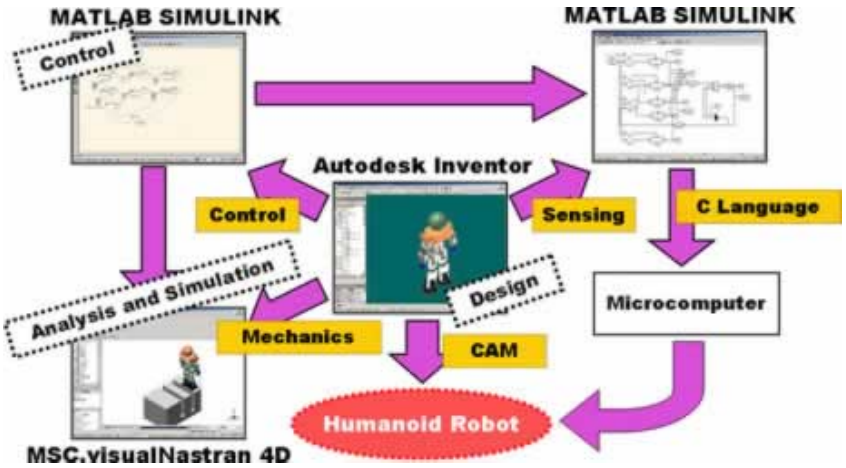


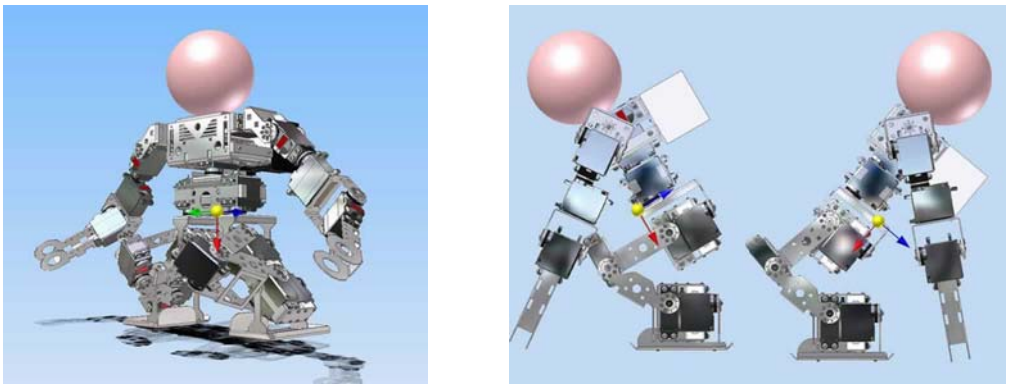
図 2･9　モデルベース開発の一例

［2］　ＣＡＤ

CAD とは Computer Aided Design の略で，コンピュータによる設計支援システムを指す．CAD を使うことによって，手書きの図面よりも修正が簡単になり，また図面の保存も簡単で，過去の図面を有効的に活用できる利点がある．CAD は広く使われるようになっており，いまでは 2 次元 CAD から，より情報量が多く，直感的に分りやすい 3 次元 CAD への移行が進んでいる．

以前まで，CADソフトは非常に高価であり，個人が気軽に扱えるものではなかった．しかし，現在ではフリーソフトや, 学生であれば非常に安価にアカデミック版を手に入れることができるなど，かなり気軽に扱えるようになってきている．(*)

CAD 上で，使用する材料を指定すれば，そのものの重量や重心位置が簡単に分り，より詳細な解析が可能となる．また，ロボットを組み上げたアセンブリ状態で，各パーツの干渉チェックや構造解析も可能で，コンピュータ上での設計の試行錯誤が容易にできるようになっている（図 2･10）．



(a) 干渉チェックが簡単に行える　　(b) 重心位置も簡単に行える

図 2･10　3 次元 CAD は設計作業をスムーズにする

(*) Autodesk 社から販売されている 3 次元 CAD の Autodesk Inventor は，アカデミック版を 1,5000 円で購入できる (2 年間ライセンス). 通常価格だと 1,400,000 円近くする高価なソフトであるため，学生諸君にはかなりのお買い得商品となっている!

［２］　ＣＡＭ

CAM とは Computer Aided Manufacturing の略で，コンピュータによる製造支援システムを指す．CAD を用いて作成した図面をもとに, コンピュータ制御された工作機械を使って, 製品を加工する．これにより，作業時間が短縮され，コストも削減することができる．

ただ，コンピュータ制御可能な工作機械は非常に高価で，CAD/ CAM システムを構築するには，かなりの資金が必要となる．そのため，個人製作の場合，加工を外注に出したり，比較的安価な工作機械（それでも 10 万から 30 万円程度はする）を購入するというのも 1 つの手段であろう．

つまり, 図 2･8 のようなモデルベース開発における機械加工の部分を CAD/ CAM システムに置き換えることにより，時間やコストを削減し，より効率的にロボットを開発することができるようになるのである（図 2･11）．

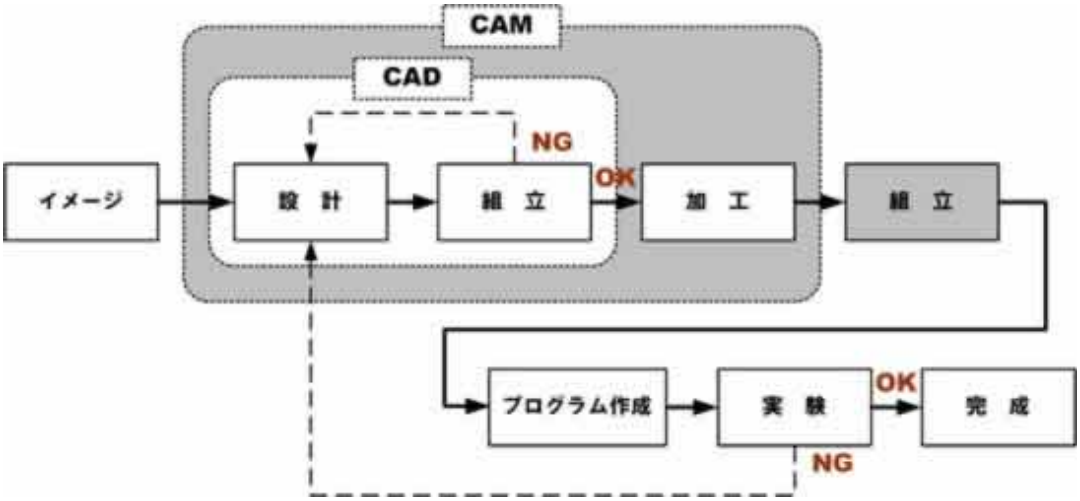


図 2.11　CAD/ CAM システムのロボット開発手順

［３］　板金加工

ロボット工作を進める上で，最もよく使われる加工が板金加工である．これは比較的簡単に安価に加工することができるためである．板金加工とは，図 2･12 のように，金属板を切って，曲げて，溶接してものを作り上げることである．

ロボット製作者の間でよく使われる金属がアルミニウムである．これは，アルミ板は軽量で，容易に切ったり曲げたりすることが可能であり，手軽に購入することができるためである．工作機械が高価なために，機械加工の工程を断念している人は，アルミ板での板金加工をお勧めする．

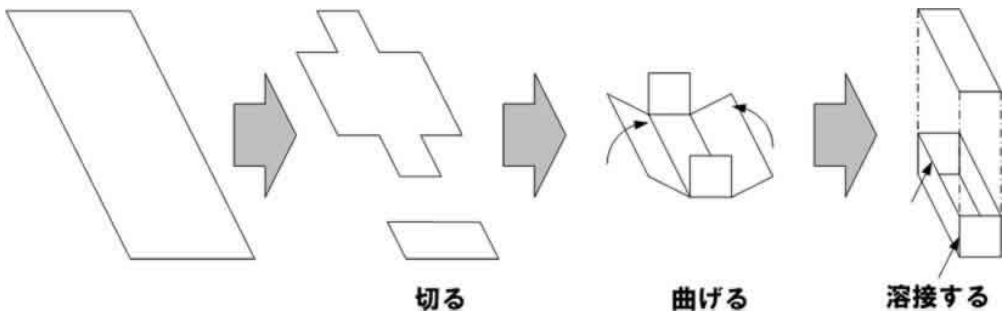


図 2･12　板金加工の工程

［4］　ＣＡＥ

今までは機械加工の工程の効率化の話をしてきたが，ロボットはソフトウェアを組み込まないと動作しない．このソフトウェア部分を試行錯誤していると，作業中のフレームに過剰に負荷がかかって部品が破損したり，アクチュエータの必要トルクが足らずに，所望の動作ができなかったりと必ず問題が発生する．また，ソフトにバグがあることに気付かないでロボットに実装すると，暴走し出し，重大な事故に発展する恐れもある．これでは，再設計や再加工を余儀なくされ，時間とコストがかさみ，CAD/ CAM システムが効率的に運用できなくなる．

CAE とは Computer Aided Engineering の略で, コンピュータによる開発工程支援システムを指す．CAE を適用することによって，ロボットにソフトウェアを組み込んだ状態での実験や解析をコンピュータ上でのシミュレーションに置き換えることが可能となり，開発スピードやコストの削減を望むことができる．（図 2･13）この開発手法は航空･自動車業界で広く使われてきたが，ロボットが産業として確立され始めてきた現在，ロボットにも適用され始めている．

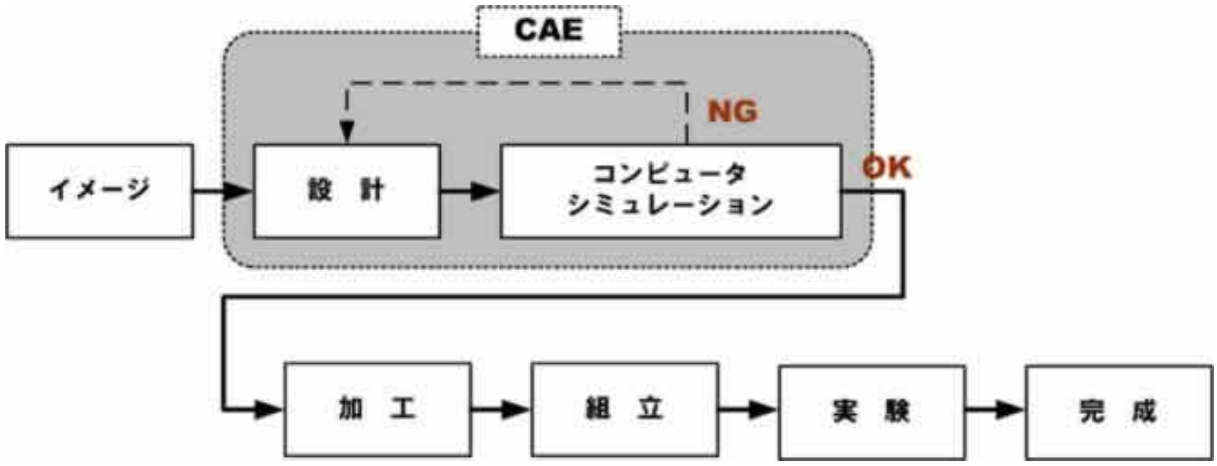
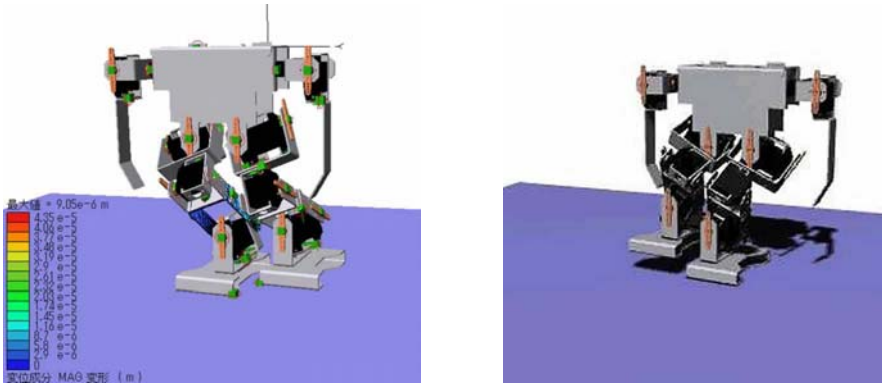


図 2･13　CAE システムのロボット開発手順

例えば，歩行ロボットの場合，歩行時のフレーム強度やアクチュエータの必要トルクを計算で導き出すのは非常に困難で，多くの場合，試作と実験の繰り返しで答えを導き出していた．しかし，こういった計算や試作，実験をコンピュータで行うことによって，開発スピードやコストを大幅に削減することができるのである（図 2･14）．



（a）構造解析　　（b）機構解析

図 2･14　コンピュータシミュレーションの様子

２．４　ロボットの問題点（これからのテクノロジー）

［１］　アクチュエータ

アクチュエータの性能を評価するものとして，大きさ，重量，出力，スピード，制御性，効率といった項目が挙げられる．もちろん，小型で軽量，高トルク，高スピードで，制御性も良く，高効率なアクチュエータが望ましい．しかし，これらを満足するようなアクチュエータは，いまのところ存在しない．

アクチュエータには様々な種類があるが，代表的なもので電気式，油圧式，空気圧式がある．しかし，これらのアクチュエータは表 2･2 に示すように，性能にも一長一短あり，上記性能評価項目全てを満たすものではない．そこで現在，望ましいアクチュエータを開発しようと様々な種類のものが開発されはじめている．

表 2･2　各アクチュエータの主な性能比較

	電気式	油圧式	空気圧式
操作出力	小～中 通常回転力	中～大 回転力および直線運動力	小～中 通常直線運動力
応答性	中	大	小～中
大きさ・重量	広範囲のサイズがある	重量が重く，出力/重量比が非常に高い ただしパワー源が必要	軽量で小形・低出力に利用価値がある
制御性	位置制御，力制御など多種	剛性が高く，高精度な位置制御が可能	空気の圧縮性により，高精度な位置決めは難しい
安全性	過負荷に弱い 電気的な防爆性を考える必要がある	過負荷に強い 発熱があり，火災の危険性を考える必要がある	過負荷には強い 発熱も少なく，人体への危険性が少ない
使いやすさ	周辺機器が揃っており，マイコンとの相性も良い	油の汚染管理に注意を要する	空気の水分除去や潤滑に注意を要する
寿命	電気的な接点が寿命を決める 接点の無い素子の開発により問題は改善	油自身に潤滑性があり，機器の寿命は比較的長い	空気には潤滑性が無く，油圧や電気に比べ劣る
価格	普通	高い	安い

［２］　バッテリ

移動ロボットの電源として，バッテリ（電池）が使用される．バッテリには，表 2･3 に示すように様々な種類のものがある．バッテリの性能を評価するものとして，アクチュエータと同じく，大きさ，重量，出力に加え，寿命が問題となってくる．もちろん，小型で軽量，高出力，大容量で永久的にもつバッテリが理想であるが，そのようなものはいまのところ存在しない．

そこで，ここでは現在ロボットによく使用されるバッテリとその問題点について述べる．

表 2･3　電池の種類

（ａ）　１次電池

1 次電池というのは，簡単にいうと充電できない使い捨ての電池のことである．昔は，充電式の電池を充電するために，1 次電池が使われていた．つまり，電気を供給する方が 1 次で，受け取る方が 2 次電池ということになる．

代表的な 1 次電池は乾電池である．単 1，単 2，単 3 形といった皆さん良くご存知の円筒形 1.5Ｖのもの，006Ｐの角形 9Ｖのものや小型のボタン型，コイン型など様々な乾電池が販売されている．

充電できない電池というのは, 充電できるものに比べて不便で経済的でないと思うかもしれない．しかし，時計のように電池 1 本で 1 年 2 年と動くものの場合，年に 1 回使うか分らないのに，充電器を買うことが便利であるかと問われるとそうではない．数回しか使わないのに，そのためだけに充電器を作る方がつまらないことである．また，緊急時（停電や災害）に電力の供給が途絶えたときも，1 次電池は活躍する．

現在は科学技術の発展に伴って，機器を動かす電力が下がってきている上に，乾電池も改良が重ねられている．このように，1 次電池は使用期間が長い機器には，2 次電池よりも効率的なのである（表 2･4）．ロボットでは，主に玩具ロボットに多く用いる（図 2･15）．

表 2･4　1 次電池が主に使われるところ（電池のサイエンスより）

機器・用途	電池の種類	取り替え
時計（ウォッチ）	銀ボタン電池	1～3 年
時計（クロック）	アルカリ・マンガン乾電池	1～3 年
補聴器	空気電池	～1 ヶ月
ポケットラジオ	マンガン乾電池	1 週間～1 ヶ月（通勤時間）
ガス・石油の点火用	マンガン乾電池	数ヶ月～1 年
灯火用（懐中電灯）	マンガン乾電池	1 ヶ月～1 年（一般家庭用）
シェーバー	アルカリ・マンガン乾電池	2 週間～数ヶ月（一般家庭用）
カメラ	アルカリ・マンガン乾電池 リチウム 1 次電池	数日～数ヶ月（一般家庭用）
ヘッドホンオーディオプレーヤ	アルカリ・マンガン乾電池	1～数日（通勤・通学）
テープレコーダ	アルカリ・マンガン乾電池	3～10 時間（録音時間）

図 2･15　これらのロボット玩具は 1 次電池を使用して動作する

（ｂ）　２次電池

2 次電池とは，充電可能な電池で，繰り返し使用できる電池のことをいう．一般に蓄電池と呼ばれているものである．2 次電池は，1 次電池とは違い，使用期間が短い機器を使用するときに，よく使われる（表 2･5）．例えば，携帯電話に 1 次電池を使用していたら，電池の買い替え代がかさみ，経済的に非効率である．

表 2･5　2 次電池が主に使われるところ（電池のサイエンスより）

機器・用途	電池の種類	1 回の使用（放電）時間，使われ方
携帯電話・PHS	ニッケル水素電池 リチウム 2 次電池	1.5～7 時間（連続使用のとき）
携帯用オーディオ機器	ニッカド電池 ニッケル水素電池	1 日～数日
ビデオカメラ	ニッケル水素電池 リチウム 2 次電池	30 分～60 分
ノートブックパソコン	ニッケル水素電池 リチウム 2 次電池	1 時間～5 時間（携帯使用）
ハンドクリーナー	鉛蓄電池 ニッカド電池	15～20 分
コードレス電動工具	ニッカド電池	10～30 分
モータ・バイク 自動車	鉛蓄電池	エンジン始動・数秒～十数秒（大電流） （使用後は発電機で充電しながら使用）
電気自動車	鉛蓄電池（他）	2 時間～1 日
電動フォークリフト	鉛蓄電池	3 時間～1 日
太陽光・風力発電バックアップ	鉛蓄電池	数分～数日間
無停電電源（コンピュータ用）	鉛蓄電池 ニッカド電池	数分の 1 秒～数十分
非常用電源（通信，保安用）	鉛蓄電池	数分～十数時間

また，2 次電池は停電時の非常灯や誘導灯，電源が OFF になると困る機器（PC など）のバックアップ電源として有効に働く．ロボットでは移動ロボットによく使われている．仕事中は蓄電池で動き回り，休み時間や夜間に充電しておけば，効率よく作業が行えるからである．また，ロボットコンテストに参加するようなロボットのほとんどは，蓄電池を使用している．

（1）　ニッカド電池（図 2･16）

ニッカド電池は，ニッケルカドミウム電池の略で，乾電池と違い，出力電圧は 1.2V である．ニッカド電池の長所は，

- 機械的強度が大
- 高率での充放電が可能
- 充放電サイクル及び保存期間が長く，長寿命

が挙げられ，短所としては，

- 比較的高価
- 自己放電が比較的大きい
- メモリー効果がある

が挙げられる．自己放電とは，無負荷状態においても容量が次第に減少していくことである．また，メモリー効果とは，電池を完全に使い切らない状態で充電を繰り返すと（俗にいう「継ぎ足し充電」），

容量が減っていく現象のことである．しかし，メモリー効果を起こした電池も，通常の完全放電，完全充電を繰り返していると，次第に解消されていくので，必ず使い切ってから充電するようにすべきである．

しかし，使い切るといって，懐中電灯などの機器に使用したり，長時間放置したりすると，過放電状態になり，電池を著しく劣化させる．過放電とは，その電池で定められた放電終止電圧以下になることで，長時間放置しておくと過放電状態になってしまうので，注意が必要である．

ニッカド電池は丈夫で長持ちするため，多くのロボットにも使われている電池である．

図 2･16　ニッカド電池

（２）　ニッケル水素電池（図 2･17）

ニッケル水素電池は，製法や構造などニッカド電池と非常に類似する点が多い．出力電圧も，ニッカドと同じく 1.2V である．しかし，ニッカド電池に比べて，

- 大容量
- 小型・軽量
- 鉛やカドミウムといった重金属を使用しないのでクリーン
- メモリー効果が少ない

などの長所が挙げられる．そのため，電子機器のバッテリとしてよく用いられていた．しかし

- 大電流の使用には向かない
- 高価

といった短所もあるため，瞬発力を要するロボットには，あまり適さない．

図 1･17　ニッケル水素電池

（３）　リチウムイオン電池（図 2･18）

リチウムイオン電池は他の 2 次電池に比べて，

- エネルギー密度が高い
- 出力電圧が高い
- メモリー効果がない
- 小型・軽量

など，利点が多い電池であるが，過充電に弱く，保護回路を必要とするなど，安全性に対する措置が必要である．そのため，市販されているリチウムイオン電池はまだ少ない．しかしながら，メモリー効果がないことから，電子機器にはニッケル水素電池に代わり，リチウムイオン電池が多く使われるようになってきている．

図 2･18　リチウムイオン電池

（４）　リチウムポリマー電池（図 2･19）　＜参照 HP: http://ks.jp.org/topic/lipo/＞

ここでは，最近になってロボットビルダーの間で急速に普及し始めている，リチウムポリマー電池について簡単に述べる．

リチウムポリマー電池は，リチウムイオン電池に比べてエネルギー密度が高く（約 1.5 倍），小型・軽量であるため，次世代の 2 次電池として期待されているが，材料の一部であるであるコバルトが高価であるため，その普及には時間がかかっている．リチウムポリマー電池は電解質に導電性のポリマーを使用しているため，フィルムの層状にすることが可能になったため，液体の電解質を使っているリチウムイオン電池よりも小型・軽量にすることができるようになった．つまり，リチウムポリマー電池もリチウムイオン電池の一部ということになる．

図 2･19　リチウムポリマー電池

リチウムポリマー電池は高価である上，取り扱い方法を間違えると，爆発や発火する恐れがあるので注意が必要である．充電時は特に注意を要する．リチウムポリマー電池は充電方式が定電圧充電なので，定電流（1C 以下）で充電する必要がある．そのため，1C 以下で充電できる装置や回路がない充電器で充電すると，膨張，爆発する（図 2･20）．また，1 セル 4.2V 以上充電し，過充電しても膨張，爆発する．このように充電には危険が伴うため，必ず専用の充電器を使用し，近くに監視する人を設けるなどの注意が必要でとなる．

図 2･20　充電や管理を間違えると，爆発・発火するので注意が必要

<参照 HP: http://www.valley.ne.jp/~h-asawa/ripo1.html>

さらに，長時間放置したり，過放電状態になるまで使用したり，過電流を流したりすると，膨張することがある．膨張したものを使い続けていると，パッケージ内部で電極が近づいてショートし，発火する恐れがある．そのため，膨張したら使用したり，いじったりせずに，処分した方が良い．

ちなみに，1 セルあたり 2.6V 以下に電圧が下がったり，最大放電電流以上の電流を流したりするとリチウムポリマー電池は，電池としての機能を失うので，こま目に電圧をチェックし，充電するなどメンテナンスする必要がある．

また，膨張したりして使えなくなった電池は，塩水につけて完全に放電させて，一般のごみとして捨てるか（可燃か不燃は各自治体による），販売元に回収してもらう必要がある．放置しておくと発火する恐れがあるので，必ず正しく廃棄しなければならない．

（ｃ）　燃料電池

燃料電池は，天然ガス，メタノールなどから得られる水素や一酸化炭素と，大気中の酸素を化学反応させることによって，発電させ，そのときに出る電気を利用するものである．図 2･21 のように，中学のときの電気分解の実験で，水に電気を加えると水素と酸素に分解した逆の現象を燃料電池では利用している．

燃料電池は，「電池」と呼んでいるが，実際は発電装置の一種である．燃料電池は，環境にやさしく，高効率で，他の発電装置に比べて騒音や振動がないため，21 世紀のエネルギーには欠かせないものになると思われる．

燃料電池は非常に高価で，まだ普及には時間がかかるが，自動車をはじめ，最近ではロボットやパソコン，携帯電話など様々な機器で利用され，実用化に向けて動き始めている．また，2005 年に開催された愛知万博では，実際に燃料電池で動くバスや機器などが導入された（図 2･22）．

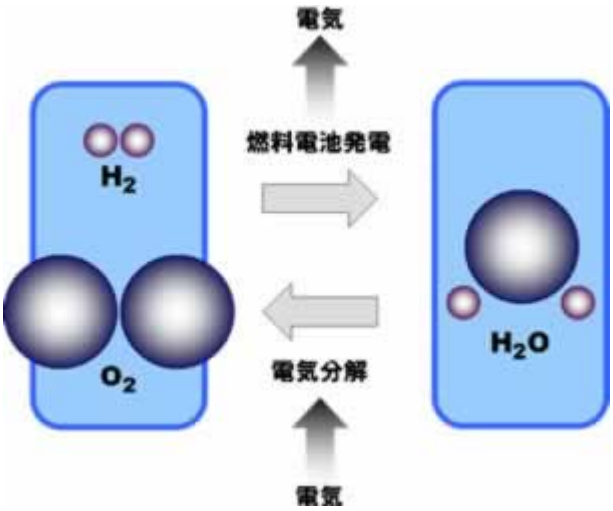


図 2･21　水の電気分解と燃料電池の関係

(a) 燃料電池バス（トヨタ）

(b) Nature Viewer（日立製作所）

図 2･22　愛知万博では燃料電池を利用したものが多く出展された

［３］　材料

ロボット本体に使用する材料としては，軽くて丈夫で加工しやすいものに越したことはない．しかし，様々な材料があるが，全ての項目で優れているものはなく，現状では緻密な構造計算，構造設計によって，軽量，強度，加工性を確保している．

そこで，ここでは現在ロボットによく使用されている材料について，簡単に述べる．

（ａ）　軽合金

軽金属とは，比重が 5 以下の軽金属のことで，マグネシウム，アルミニウム，チタニウムの合金が挙げられる．

マグネシウムは密度が鉄の 1/4.5 で，金属材料の中では最も軽量なものの部類に属する．通常はアルミニウムや亜鉛を配合した合金として使われる．マグネシウム合金は，ポータブルオーディオプレイヤーやパソコンの筐体などに使用されている．ロボットでは，ホンダの ASIMO に使用されている．

また，アルミニウムは密度が鉄の 1/3 で，加工性に優れることから，ロボットに最も使用されている．アルミニウム合金には展伸材と鋳造材があり，アルミニウム合金の展伸材は，添加元素の違いによって表 2･6 のように分けられる．

表 2･6　アルミニウム合金

合金の種類	特徴	用途
1000 系 純アルミニウム	99%以上の純アルミ系材料．加工性・耐食性に優れているが，強度が低く構造材として適さない．アルマイト処理後、耐食性の優れた表面光沢が得られる．	装飾品，工業用タンク類，反射板，台所用品，箔，コンデンサ
2000 系 （Al＋Cu 系合金）	ジュラルミンの名称で知られるアルミ合金で，鋼材に匹敵する強度を持つ．しかし比較的多くの Cu を含むため耐食性は劣る．	航空機材料
3000 系 （Al＋Mn 系合金）	Mn の添加により純アルミニウムの加工性，耐食性を低下させずに 1000 番系よりも強度を増した合金．	建築用材，車両用材，アルミ缶，台所用品，電球口金
4000 系 （Al＋Si 系合金）	Si の添加により熱膨張率を抑え、耐摩耗性が改善されている．Si 粒子の分散により，アルマイト処理によって暗灰色の自然発色皮膜を作る．	ビル外装パネル，カーテンウォール
5000 系 （Al＋Mg 系合金）	耐食性がよく，強度も比較的優れている．	車両，船舶，建築用材，機械部品，通信機器部品
6000 系 （Al＋Mg＋Si 系合金）	強度・耐食性ともに優れており，代表的な構造材．	建築用サッシ，車両，家電製品，家具
7000 系 （Al＋Zn＋Mg 系合金）	アルミ合金の中で最も強度が優れている．	航空機，鉄道車両，金属バット，スキーストック

ロボットビルダーで最もよく用いられているのは，重さや強度，加工性のバランスの良い 5052 のアルミニウム合金である．加工性に関しては，1000 系の純アルミニウムが最も良いが，柔らか過ぎるために，ロボット本体の構造体としてはあまり向いていない．逆に，鋼材に匹敵する強度をもつ 2017（ジュラルミン（duralumin））や 2024（超ジュラルミン（super duralumin）），アルミニウム合金の中で最強の強度をもつ 7075（超々ジュラルミン（extra super duralumin））は，硬過ぎるために加工性が悪く，加工するためにはそれなりの工作機械が必要となる．

チタニウムは密度が鉄の 60%で鉄鋼に匹敵する強度をもつ．しかし，チタニウムは加工性が悪く，高価であるため，ロボットの構造材には向かない．

（ｂ）　エンジニアリングプラスチック

エンジニアプラスチックとは，汎用プラスチック（ポリスチレン，ABS，アクリル，ポリ塩化ビニルなど）よりも耐熱性，耐食性に優れ，強度を増したプラスチックである．ポリカーボネート（PC），ポリアセタール（POM），ポリブチレン・テレフタレート（PBT）などがあり，主にロボットのギアやケースなどに使用される．

さらに強度を増したものに，航空や宇宙の分野で使用されているポリエーテル・エーテルケトン（PEEK）といったスーパーエンジニアプラスチックがあるが，非常に高価なため，まだロボットには採用されていない．

（ｃ）　繊維強化プラスチック

プラスチック材は軽量化のメリットはあるが，強度を出すことはできない．そこで，セラミックなどの強化硬化材料をブレンドして，その強度不足を解消したものが繊維強化プラスチック（FRP）である．

FRP は使用する繊維の違いによって CFRP（カーボン繊維），GFRP（ガラス繊維），KFRP（ケプラ繊維）の 3 種類に分けられている．

３．　制御とは

３．１　人間とロボットを比較する

皆さんはテレビや雑誌などで有能な人を見ると，よく頭が良いという．皆さんにとって“頭が良い”とは何か？計算が早い人，頭の回転が早い人，のみ込みが早い人など，人によって様々だと思う．

では，ロボットで言う頭が良いとは何を示すのか．恐らく，皆さんが考えている頭の良いロボットとは，自分で判断して動作するロボットであろう．その場合，必要になるのがセンサ（sensor）である．

センサとは，外界の物理情報を電気的な信号に変換してくれるものである．物理情報とは，距離，速度，加速度，圧力，音，温度，湿度などで，電気的な信号とは電圧のことである．例えば，距離センサであれば，物体とセンサの距離に応じて，センサから出力される電圧が変化する．

簡単に言うと，センサを多く積んでいるロボットが，頭の良いロボットということになる（ただし，その場合，脳であるコンピュータの処理能力や，それなりのプログラム技術が必要となる）．人間には視覚，聴覚，嗅覚，味覚，触覚といった 5 感が存在し，それらが人間のセンサとして働いる．5 感とセンサの主な対応は以下の通りになる．

- 視覚（目）・・・カメラ，光センサ，赤外線センサなど
- 聴覚（耳）・・・マイクロフォン，超音波センサなど
- 嗅覚（鼻）・・・においセンサ
- 味覚（口）・・・イオンセンサ，バイオセンサ
- 触覚（皮膚）・・・圧力センサ，温度センサ

これら 5 感からの情報を脳が考え，処理して行動に移っている．頭の良い人は，その処理がとても早かったり，独特の処理方法で人々をあっといわせているのであろう．

ロボットの場合，センサから出力される電圧に応じて，マイコンで行動を制御し，ロボットの自律的な動作を実現する．そのときの頭の良し悪しは，マイコンの処理速度や効率的なプログラム技法により決定される．

３．２　フィードフォワードとフィードバック

［１］　外乱に対しての対応の違い

頭の良い人は，センサを使って常に周りの状況を把握しながら行動する．例えば，自宅から駅まで向かう道順を考える．通常，通い慣れた道であれば難なく，駅までたどり着くことができる．例え目隠しや耳栓・鼻栓をしても，全ての路面状況，環境情報を把握し，運転操作を誤らなければ，駅に辿り着くことができるだろう．しかしこの場合，予想外の出来事（飛び出し，工事中，視界の悪さなど）には対応できなくなる．なぜだろうか．

全ての感覚を遮断された状態だと，記憶のみを頼りに道を進むことになる．記憶と行動が完璧であれば，感覚を遮断されていても駅に到達することができる．しかし道の途中で，誰かが突然飛び出してくるかもしれないし，障害物があるかもしれない．もしかしたら工事中でいつもの道が通れないかもしれない．雨が降った後で路面が凸凹かもしれない．もしくは夜中になれば真っ暗で先が見えなくなるかもしれない．このように実際には外乱（disturbance）が常に発生するのである．

このように記憶だけを頼りに行動する制御方法がフィードフォワード（feed forward）制御である．フィードフォワード制御の場合，先に述べたように外乱に対応できず，非常に制御性が悪くなる．

しかし，目や耳など 5 感をフル活用すれば，予想外の状態にも対応できるようになる．段差も障

害物も突然誰かが飛び出してきても，認識できるようになる．このようにセンサを使って外乱に対応できるように制御することをフィードバック（feedback）制御という．

皆が見て，「凄い」と思うロボットや自分で認識して行動する自律ロボットは，センサを用いてフィードバック制御を行っている．このように書くと，フィードフォワード制御は駄目なように感じるかもしれないが，そんなことない．ロボットに限らず，人間もフィードバック制御とフィードフォワード制御を上手く使いこなして行動しているのである．

［２］　補正

フィードバック制御は図 3･1 のようなシステムで構成される．ここで重要なのは，出力を入力側に戻してより良い結果を導くということである．つまり，何か起こした行動（出力）に対して，上手く行かなかったら，なぜ上手く行かなかったのかを原点（入力）に戻って考え，より良く行くように行動しようとするのである．

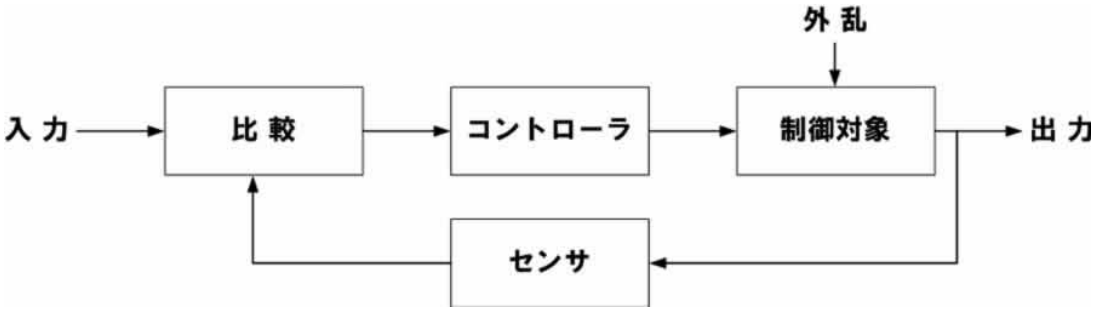


図 3･1　フィードバック制御の構造

ここで注意したいのは，フィードバック制御を適用すれば何でもかんでも良い結果が得られるわけではないということである．フィードバック制御はあくまで外乱に対して補正するだけで，基盤がしっかりしていないものにフィードバック制御を施しても，余計に状況が悪化するだけである．

こういった考えは，2 足歩行ロボットを製作している人に意外と多い．例えば，姿勢を制御するセンサにジャイロセンサというものがあるが，ロボットが上手に歩かないとすぐに「ジャイロセンサを搭載すれば安定するだろう」と思ってしまう．しかし，ジャイロセンサは角加速度を計測するセンサで，安定的な歩行を実現するセンサではない．ロボットに何らかの外乱が生じ，ロボットに急な加速度変化が発生したとき，現在の姿勢に補正をかけるのがジャイロセンサの正しい使い方である．つまり，センサレス状態での歩行がしっかりしていないのに，ジャイロセンサを搭載しても余計にバランスを崩すだけなのである．

［３］　モータでのフィードバック制御

ロボットは動作中，多くの外乱に状態を乱される環境下にある．そのためロボットに使用するアクチュエータも外乱に強いものでなければならない．つまり，速度や位置など出力状態を調べる検出器（センサ）を用いて，外乱による出力変化をできるだけ抑えなければならないのである．そのため，DC モータやステッピングモータのようにフィードフォワード制御で動くモータは，ロボットの使用にはあまり適さない．

これらのモータには，速度や位置を検出することができるセンサを組み込んだフィードバック制

御系が必要となる．このようにフィードバック制御を用いて指令値通りにモータ出力を制御することをサーボ制御（servo control）と言い，サーボ制御を用いたモータをサーボモータ（servo motor）という．

サーボモータには，応答性が良い，過負荷に強い，トルクムラが少ないなど，どんな状況でも安定して動作することが必要とされる．サーボモータとしては，メンテナンスの必要がないブラシレスモータや安価な DC モータが良く使用される．ステッピングモータはパルス駆動するモータなので，サーボ制御を用いることはあまりない．ステッピングモータは外乱に弱いモータなので，用途や環境に注意して使用する必要がある．

４．　ロボットの機構

４．１　機構

どんなに良いセンサを積んで，良い制御をしても，ロボットの機構（mechanism）によってはその能力を存分に活かせない場合がある．また，機構がお粗末だと，所望の動作を行わせる場合，プログラマーやコンピュータにかかる負担（計算量）が大きくなる．逆に，機構が立派だと，大したセンサやコンピュータを積んでいなくても，簡単なプログラムで所望の動作を行わせることができるようになる．からくりロボットはその最たるものといえるだろう．

機構とは「2 個以上の部分からなり，1 つの運動により他が運動を起こすように配備された機械の部分」のことをいう．要は，モータの回転運動やシリンダの直線運動を利用して，ある部分に所望の動作を実現させるのが機構なのである．

機構は，リンク（link），カム（cam），歯車（gear）など様々な部品から成り立つ．そして，これらの部品のことを機素（machine element）という．これら機素が構成する機構は，組み合わせによって，平面的な動作をしたり立体的な動作をしたりする．前者を平面機構，後者を立体機構といい，ロボットには平面機構のものや立体機構のものなど色々な種類が存在する．

４．２　自由度と姿勢

互いに接触して相対運動する 2 つの機素の組み合わせを対偶（pair）という．そして，2 つの機素の相対位置を確定することができる最小の入力の数を対偶の自由度（degree of freedom）という．

自由度とは「空間において剛体の運動を記述するのに必要な独立変数の数（最大 6)」と定義されており，運動の数を示す．対偶は自由度によって，様々な種類に分類することができる．

ロボットの分野では対偶をジョイント（joint）と呼び（対偶は機構学の言葉），直進ジョイント，回転ジョイント，円筒ジョイント，球ジョイントに分類され，自由度はそれぞれ 1，1，2，2，となる．そして，これらのジョイントの組み合わせによってロボットの形式が決定される．

剛体の運動の自由度は 6 で表現される．直交座標で 3 次元空間の剛体の位置，姿勢，運動を表す場合，x 軸，y 軸，z 軸の 3 つの座標成分と各軸まわりの α，β，γ の 3 つの回転成分（ロール，ピッチ，ヨー）の合計 6 に対応するからである．したがって，物体の位置，姿勢を任意に操るためには，最低 6 自由度が必要となる．

一般的に人間の腕は機能的な視点から，肩 3，肘 1，手首 3 の計 7 自由度あり，6 よりも多くなっている．この 6 よりも多い自由度を冗長自由度（redundant degree of freedom）と呼び，このような自由度構成を冗長性（dedundancy）があるという．人間はこの冗長性により，手先の方向と手首の位置を固定したままで肘を旋回することで，腕の姿勢を変えることができるのだ．

例えば，コーヒーカップでコーヒーを飲むとき，自由度が 5 の腕だとその動作によってはコーヒーをこぼす（コーヒーカップが傾く）恐れがある．コーヒーカップ自体の自由度は 6 であるので，コーヒーをこぼさずに飲むには自由度 6 の腕が必要になるのだ．しかし人間の腕の自由度は，冗長自由度が 1 あり 7 存在する．そのため，コーヒーカップの位置や姿勢を変えずに腕の姿勢を変化させることが可能となるのだ．これにより，人間は巧みに障害物を回避し，状況に応じた安全な行動ができるのである．

産業用ロボットでは，目的とする作業に適した動作が可能となるように自由度構成が決定されている．ロボットが平面機構で 2 次元平面内でしか作業しないものであるならば，自由度は位置を決定するのに 2，方向を決定するのに 1 の計 3 自由度あれば十分である．しかし，最近では作業効率

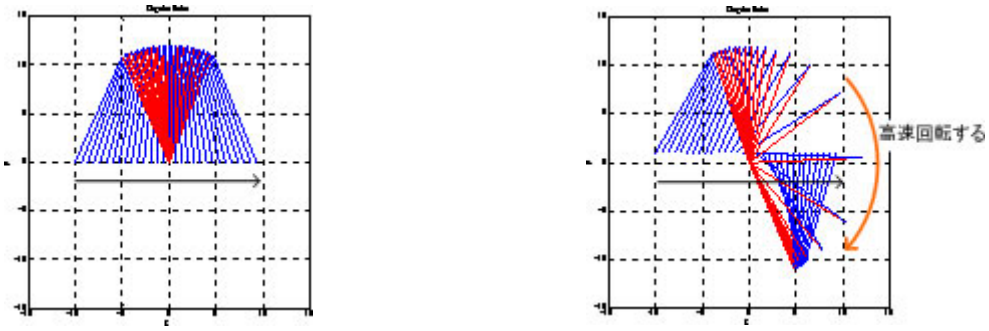
の上昇，可動範囲の省スペース化により，冗長自由度を持ったロボットアームが増えてきている．

しかし，多くの自由度を持つ場合，注意しないといけないのが特異点（singular point）の存在である．特異点とはある特定の方向の自由度が失われてしまう姿勢のことである．これを自由度の縮退（degeneracy of degrees of freedom）といい，このときの姿勢を特異点姿勢（singular configuration）と呼ぶ．

(a) 特異点姿勢①　　(b) 特異点姿勢②

図 4･1　2 自由度のロボットアームの特異点姿勢

ロボットアームの先端を一定速度で動かそうとすると，図 4･2（a）のように特異点（x=0，y=0）を通過するときは無理なく動作させることができるが，図 4･2 (b) のように特異点近傍（x=0，y=1）を通過するときはジョイントを高速回転させなければならず(特異点上では無限大の角速度が必要)，アクチュエータの性能上，ロボットアームの先端の軌跡が変動してしまう問題が生じてしまう．



(a) 特異点を通過するときは無理のない運動になる　　(b) 特異点近傍ではリンクが高速に振られる

図 4･2　特異点近傍の運動

図 4･2 のような 2 自由度のロボットアームの場合，特異点姿勢は動作範囲の外にあるので問題はない.しかし 5 自由度や 6 自由度などの産業用ロボットでは，特異点姿勢が動作範囲内に多数存在する.このような産業用ロボットが作業中に特異点近傍を通過すると，ロボットの破損や暴走，人身事故などの事故が起こりかねない.そのため，このようなロボットを動作させる場合は，特異点姿勢がどこにあるのか，軌道を設定する前にあらかじめ調べておく必要がある.これは軌道制御で扱われる問題だが，機構設計時にジョイントや自由度の構成を工夫して，特異点回避が容易になるように考慮してあげる必要があるのだ．

４・３　ロボットの機構

［１］　マニピュレータ

ロボットアームはマニピュレータ（manipulator）とも呼ばれる．産業用ロボットは主にマニピュレータで構成されている．3 次元空間内でマニピュレータの先端（これをエンドエフェクタという）の位置決めをするには最低 3 自由度が必要となる．この自由度を実現するためには，直動，回転，旋回の組み合わせ次第で，様々な機構を構成することができる．

円筒座標ロボット（cylindrical coordinate robot）は，回転と 2 つの直動関節が組み合わさった構造で，極座標ロボット（polar coordinate robot）は，回転，直動，旋回関節が組み合わさった構造をしている．これらの構造のマニピュレータは，動作範囲が広く，エンドエフェクタの位置の記述がしやすく，制御も比較的簡単に済む．また，他のマニピュレータに比べて位置決め精度も出やすくなっている．

1962 年に世界で最初に製品化された産業用ロボットである「バーサトラン（Versartran)」と「ユニメート（Unimate)」は，それぞれ円筒座標型，極座標型の構成をしている．1960 年代から 70 年代初期まではこれらの形式のマニピュレータが活躍していた．ちなみに，日本では川崎重工業が 1969 年に発表した「川崎ユニメート 2000」が，国産の産業用ロボット第 1 号で，自動車のボディを溶接する生産ラインに導入されていた．

直角座標ロボット（cartesian coordinate robot）は，関節のもつ自由度が x，y，z 軸に独立しており，それぞれの座標軸が直交している構造をしている．構造が単純なため，制御がきわめて簡単であり，高精度を得ることができる．そのかわり，広い動作範囲を取ろうとすると大型化してしまう欠点がある．

関節ロボット（articulated robot）は，主に回転と旋回関節で構成されている．この構造は，構造がコンパクトなのにも関わらず，動作範囲が広いために，3 次元空間内の位置，姿勢決めには最も有効なマニピュレータである．しかし，座標計算，制御が複雑であるため，精度が出にくい欠点がある．

関節ロボットには，主に平行四辺形リンク型，スカラ型，人間型の 3 つがある．平行四辺形リンク型ロボットは，アームの根元にモータを配置しているので，アームの動作部分の重量を抑えることができる．そのため製品や荷物の運搬作業（パレタイジング，palletizing）に広く使われている．

スカラ型ロボット（selective compliance assembly robot arm，SCARA）はアームの先端が 2 次元平面内を任意に動ける構成をしており，垂直方向には剛性が高く，水平方向には剛性を低く（柔らかく）することができる．これにより，組み立て作業に広く使われている．

また，冗長自由度が 1 加わった人間型ロボット（anthropomorphic robot）も最近では広く使われるようになってきている．

［２］　移動ロボット

移動ロボット（mobile robot）で用いられている機構には，主に車輪移動機構，クローラ式移動機構，脚移動機構などがある．

（ａ）　車輪移動機構

車輪移動機構は平坦な移動環境では，他の移動機構に比べて高速，高効率な移動を実現すること

ができ，機械的にも比較的シンプルで制御性も良いという特徴をもっている．そのため，自動車や産業用車両，福祉機器（車いす）などに用られる．最近では全方位に移動できる車輪移動機構のロボットも開発されており，アイディア次第で様々な形式の車輪移動機構のロボットが開発される可能性があるだろう．

（ｂ）　クローラ式移動機構

クローラ式移動機構は不整地やぬかるみ，凹凸のある地面に対して有効な移動機構である．そのため，農林業，建設，軍用などに用いられる．駆動力も大きく，安定しているので，バランス制御の必要もない．クローラの構造には様々な形式があり，最近では階段や障害物がある空間（災害現場，地雷除去など）の移動機構として使われることが多くなっている．ちなみに一般的には「キャタピラ」と呼ばれているが，これは米国のキャタピラー社の登録商標なので，一般名称ではない．

（ｃ）　２脚移動機構（ヒューマノイド）

2 脚ロボット（biped robot）はヒューマノイドに限らず，鳥類も使用している移動形式である．もちろん，2 脚ロボットも機能に応じて様々な形式のものが，研究，開発されているが，ここでは主に人間型ロボット（humanoid robot）について述べる．

通常，2 脚ロボットは回転関節を利用した多リンク機構で構成される．また，片足につき，股と足首関節に 3 自由度，膝関節に 1 自由度の計 7 自由度でモデル化される．しかし，実際に使用されている 2 脚ロボットの自由度構成は，股関節 3 自由度，膝関節 1 自由度，足首関節 2 自由度の計 6 自由度となっているものが多い．これは前述したように，物体（足裏）の位置や姿勢を表現するのには，自由度が 6 で十分だからである．

脚移動ロボットの機構は, 関節の駆動方法によって, その形式は大きく変わってくる. なぜなら, ロボット全体の重量でモータは大きな割合を占めるため，その配置の仕方によって駆動形式や制御方法が変わってくるからである．駆動方法は，慣性モーメントの減少や機構のスマートさを考慮したプーリやタイミングベルトを使用した駆動法, 軽量化や衝突時の安全性を考慮したワイヤ駆動法, 高出力が魅力である直動油圧シリンダ駆動法など様々である．

また，モータを全く使用しない受動歩行ロボット（passive walking robot）や直動アクチュエータを使って，スチュアートプラットホームと呼ばれるパラレルリンク機構を用いているものなど，2 脚ロボットにはたくさんの機構が存在する．

（１）　静歩行

2 脚ロボットの移動方法には大きく分けて 3 種類ある. その 1 つ目が静歩行（static walk）である．静歩行は人間でいう氷の上を歩くときの歩行方法である．氷の上で早く歩こうとすると滑って転んでしまうため，氷の上では常にバランスを取りながら 1 歩 1 歩着実に歩を進めなければならない．ここでの「バランスを取る」というのは言い換えると，支持脚多角形内に重心投影点がある状態をいう．

支持脚多角形とは，地面と接している部分を線で結んだ領域で，この状態で静止していればロボットは倒れることはない．この状態を静的安定状態（バランスを取っている）という．

静歩行は，常に支持脚多角形内に重心がある（バランスを取った）歩行方法なので，歩行の最中，どこで動きを止めても倒れることはない．つまり，氷の上や不整地など，慎重に歩く必要があるときに用いる歩行が静歩行なのである．そのため移動速度を速めようとすると，勢いがついてしまい転倒してしまう．

（２）　動歩行

静歩行とは，簡単にいうと勢いをつけない歩行である．勢いというのは「慣性（inertia）」のことで，この勢いを考慮しながらバランスを取る歩行が動歩行（dynamic walk）である．動歩行，支持脚多角形内に重心投影点がない場合があるので，歩行の最中に動きを止めると転倒してしまう．私達が普段歩いているときのことを想像してみると分かりやすいだろう．

動歩行は静歩行に比べ移動速度が速く，重力を利用した加速や可能であるので消費するエネルギーも少なくて済む．しかし慣性力を考慮するため，動的な安定が不可欠になり，その制御方法は静歩行比べて複雑なものになる．動歩行の制御方法の代表的な理論として ZMP（Zero Moment Point）理論があるが，ここではその説明は省く．興味がある読者は，ロボット専門書を参考にするのが良いだろう．

（３）　走行

走行（running）とは，ロボットの両足が路面から離れた非接地状態を含む脚式移動のことをいう．つまり，両足が浮いた瞬間がある歩行を走行と呼ぶ．21 世紀に入り，走行を実現したメーカーロボットが増えてきたが，まだ人間のような走行の実現には，各要素技術の進歩が必要である．

特に，アクチュエータの技術進歩は必要不可欠である．両足が浮いているとき，ロボットは自由落下系となり空中制御が必要となる．また着地時に大きな衝撃力が発生し，さらにロボットを空中に浮かせるためのパワーが必要となる．このように人間のような走行の実現には，まだまだ多くの技術課題が残されている．

（ｄ）　４脚（多脚）移動機構

4 脚（多脚）移動ロボットの歩き方は遊脚（持ち上げている脚）の順序やそのタイミングのズレ具合によって，様々な歩き方が存在する．これを歩容（gait）と呼ぶ．

アンブル歩容は低速歩行のときに用いる歩容で，静歩行である．この歩容のデューティー比（1 周期中の支持脚となっている時間）を早くすると，トロット，ペース，バウンド歩容となり，移動速度の速い動歩行へと移っていく．トロット歩容は対角の脚を上げた歩容であるため，脚を横に開いてあるく動物に多く見られる歩容である．一方，ペース歩容は片側の脚を上げた歩容であるため，背が高くて脚を左右に開かない動物に多く見られる歩容である．

（ｅ）　特殊移動機構

その他にも，車輪式移動と脚式移動を組み合わせた機構のロボットがある．また，蛇のように体をくねらせて移動するロボット，環境に応じて自らの形状を変形するロボットなど様々である．

こういったロボットは様々な大学や研究機関で研究が行われているので，調べてみると面白いだろう．

５．ロボット創造に必要な総合力とは

５．１　探究心

ロボットを作り上げるためには，これまで述べてきたような様々な技術が必要となる．しかし，技術だけあっても良いものは作れない．これは，ロボットに限ったことではなく，ものつくり全般においていえることである．技術だけで良いものが作れたら，今頃，世の中に良いものが溢れ返っているだろう．

本書を手にしている学生諸君は，学校に何を求めているだろうか．夢や希望をもって，それを実現するための技術を学びにしているだろうか．ものつくりにおいて最も重要なのは，「夢や目標をもち，未知の技術に対する挑戦者としての探究心」である．探究心がない人は，学校でもただ与えられた課題をこなすだけのつまらない毎日だと思う．

では，この探究心はどのようにして発生するのか．この問いを紐解く 1 つのアプローチがロボットであり，ヒューマノイドロボットに隠されている．本章では，筆者のもとで 2 足歩行ロボット競技会 ROBO-ONE を目指し，ヒューマノイドロボットの製作に励んだ学生達を例に，いかにまどろんだ探究心を覚醒していくかを述べたいと思う．

５．２　現在のものつくりシステムの問題点

学生になってからのモチベーションの違いというのは，子供の頃に遊ぶ玩具の質の違いに大きく係わるように思う．元来，玩具とは，人間の根源に近いところにある物欲，闘争心，好奇心，創造意欲，そしてその結果として得られる達成感，また，やすらぎを求める心に応えるものであった．高度経済成長期を支えた団塊の世代はこういった玩具に触れて，ものつくりに対する熱い心を子供の頃から養っていたように思う．

しかし現在はどうだろうか．テレビゲームやインターネットが普及し，いまでは玩具は，欲求を満たすだけのものに変わってきている．そこに好奇心や創造意欲はなく，ただひたすら“save”と“reset”を繰り返すだけなのである．

1960 年代と 2000 年代の玩具の決定的な違いは，リアル（ハード）かバーチャル（ソフト）かである．バーチャルの場合，同じ作業を 100 回やれば 100 回同じ結果が出てくる．しかしリアルの場合，同じ作業を 100 回やったら 100 通りの答えが出てくる．つまりバーチャルの場合，問題から答えの流れを全てフローチャートにできてしまうのである．いわば「敷かれたレールの上を走る列車」，すなわち予定調和なのである．

いまの学生が，学ぶモチベーションを失いかけているのも，教科書に答えがあり，それに従えばよいという予定調和のためである．試行錯誤しても，出てくる答えは予定していたものなので，何の面白みもない．図 5･1 に示すように，方法と答えが用意された問題を解き，予定していた答えを出すというフィードフォワードなシステムが，モチベーションを下げ，理科離れを引き起こしているのだ．

図 5･1　理科離れのものつくりモデル

リアルの場合，例えシステムが予定調和であっても，必ず外乱（disturbance）が入る．これにより

調和は崩れる．その際に生まれる“Why?”が好奇心や創造意欲をかきたて，モチベーションを上げるのである．予定調和が外乱によって崩されたとき，図 5･2，図 5･3 のようなフィードバックシステムが必要となる．

図 5･2，図 5･3 は筆者のヒューマノイド造りの体験から得たものつくりシステムである．図 5･2 はチーム（群）におけるものつくりシステムで，図 5･3 はメンバー（個）のものつくりフローである．構造は同じであるが，群としては「結果」が，個としては「内容」が求められる．

ものつくりシステムは，「言葉」「行為」「考察」の 3 つの柱からなる．夢を「言葉」にし，その言葉を「行為」に移し，その結果（現実）と夢の違い“Why?”を「考察」し，それをまた「行為」に移す．この繰り返しが，ものつくりのコアとなる探究心を向上させる．「行為」はその人の個性によって，その振る舞いが変わる．個性は「遊び」「技術」「センス」の 3 つにより設定可能で，これらをいかにチューニングするかで決まる．

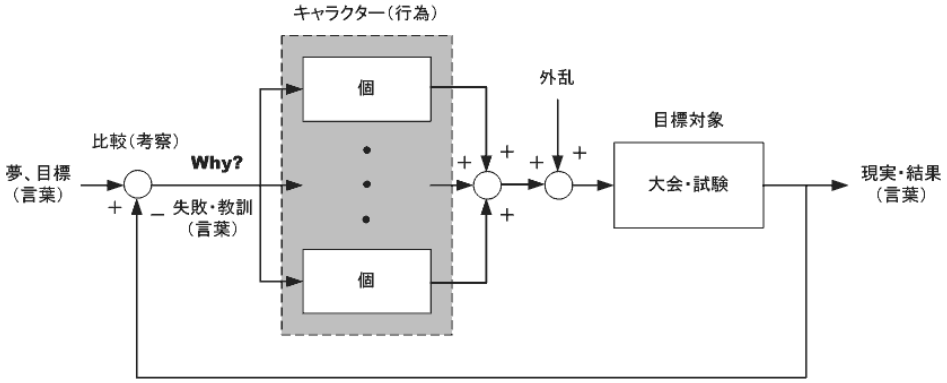


図 5･2　群のものつくりモデル

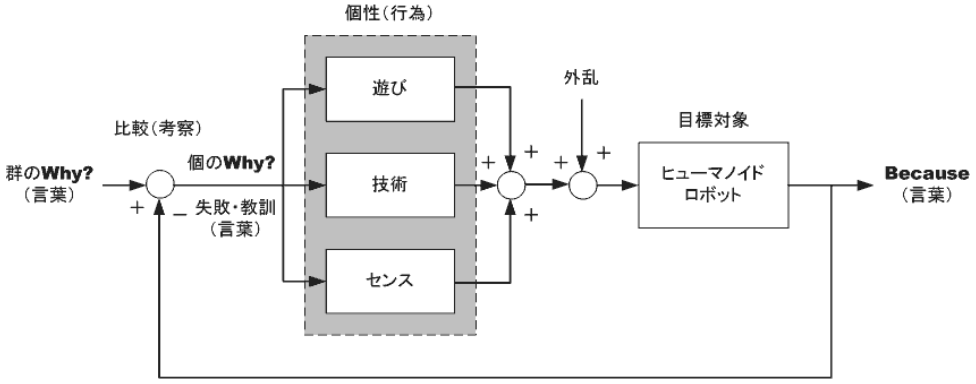


図 5･3　個のものつくりモデル

問題は，図 5･1 のモデルに従ってきている人間をどのようにして，図 5･2 や図 5･3 のモデルに変えるかである．そこで生まれる探究心をいかにして継続していくかである．

問題点を整理すると，以下のようになる．

(P1) いかにモチベーションを上げるか

(P2) いかに技術を活かして行くか

(P3) どう個性を身に付けるか

(P4) いかに個性をチューニングするか

(P5) 最終的にいかに個性を確立するか

５．３　いかにモチベーションを上げるか

［１］　なぜヒューマノイドロボットか

なぜものつくりの対象がヒューマノイドロボットでなければならないのか?その答えは簡単である．「楽しい」からである．学生のモチベーションを向上させるためには，絶対的に「楽しむ」ことが必要となる．

では，なぜヒューマノイドロボットが楽しいのか?この問いに欠かせないのが「アニメ」である．日本人は子供の頃からロボットアニメに育てられてきた．男の子はガンダム，女の子はドラえもんがそれに当たるだろう．それらロボットの挙動は“非現実的”なものであるが，子供達はそれに憧れる．そして，非現実的な憧れ（空想）をなんとか実現しようとする．それがモチベーションとなり，その行為･過程が「楽しさ」を生む．アミューズメントやホビー業界の存在は，これを証明している．

筆者は大学で 3 年生のロボット基礎実験を担当していた．そこで筆者は実験に「楽しさ」を実感してもらおうと「遊び」を取り入れてみた．実験は 2 週間あり，1 週目に運動学を使った 2 足歩行ロボットの動作プログラムを作成し，実際にロボットに組み込み，シミュレートさせた．2 週目は 1 週目の内容を踏まえ，ロボットを自由に触れさせるという構成にした．何のテーマもなく触れさせるとただの遊びになるため，1 週目のレポートとして「次週，ロボットに何をやらせたいか」を自由に考えさせ，それを企画書として提出させることにした．この企画という作業が，空想をいかに実現するかを考える作業で，本実験の最大のポイントである．

筆者は 2 週目を担当したのだが，まず驚いたことは，普段，授業をすっぽかし，居眠りしていそうな学生も実に活き活きと実験に取り組んでくれたことである．皆，企画書通りに事が運ばないことに”Why?”を感じ，議論し合い，ほとんどの学生が「時間が足りない」と言って，時間ギリギリまでロボットをいじっていたのである．

2 足歩行ロボットという普段お目に掛かれないものに触れるという物珍しさもあったかもしれないが，レポートに「凄く楽しかった」とか「ロボットに興味が持てた」と書く学生が多く，多くの学生が楽しく実験に取り組んでくれたようであった（表 5･1）．また，「もう一度チャレンジしたい」「MATLAB でモーションを作りたい」「もっと詳しく学びたい」という意欲的な声も多く見られた．

表 5･1　2005 年度ロボット基礎実験の感想（126 名/137 名）

楽しかった，面白かった	94 名（75%）
意外と難しいことに驚いた	33 名（26%）
時間が足りなかった	26 名（21%）
企画前にロボットにもっと触れたかった	13 名（10%）
1 人 1 台割り当てて欲しい	6 名（ 5%）

この実験の結果を見る限り，明らかに学生は楽しさを感じ，モチベーションが上がったことを示している．これは実験に「遊び」を取り入れた 1 つの到達点だと思う．

［２］　ヒューマノイドロボットの社会的有用性

ヒューマノイドロボットは，モチベーションを上げるための教育材料に終わらない．これからの超

高齢化社会に向け，多くの社会的有用性を備えており，いまも多くの技術者のモチベーションを上げ続けている．

ヒューマノイドロボットは多岐にわたる分野の総合技術であり，今までにない複雑な技術形態をなしている．そのため，今までの技術や産業からは見ることのできなかった視点から，ニーズを捉えることができ，各分野の技術力向上や新たな技術産業の発掘の可能性を秘めている．

また，ヒューマノイド（人型）であることは「インターフェースとして最も人間に有効な形」である．なぜなら，人間とロボット（機械）が“共通意識”を持つことは，作業を円滑に進める上で非常に重要なファクターになるからだ．人が何をしようとしているのか，ロボットが何をしようとしているのか，インターフェースがヒューマノイドであれば意思の疎通が簡単に図れ，分厚い取扱説明書も読む必要がなくなるのである．

５．４　いかに技術を活かしていくか

［１］　自己分析

モチベーションが上がると，自発的な行動が取れるようになる．すると，大学の講義が居眠りの時間ではなくなる．これは良いことであるが，自分自身を理解できていない段階で，闇雲に行動しても意味はない．

美味しいものを食べたいからといって，うに丼，うな重，すき焼きと食べたら，気持ち悪くなるだけで，結局何が美味しかったか分からなくなってしまう．これと同じように，手当たり次第に大学の講義を受けても，自分はどんな人間で，何をしたいのか，深層心理の奥深くまで自分を見つめ，本当にやりたいことを定めないと，結果的に混乱が生じるだけになる．

そこで筆者が良く用いる自己分析法が，夢を最小単位まで落として行く「なんで論法」である．これは，ものごとに対してとにかく「なんで」と問いかけ，答えが出なくなるまでものごとを掘り下げていく方法である．

筆者の場合，図 5･4 のように「ロボットにプロレスをさせたい」という夢から「なんで」と掘り下げていくと「人を手玉に取ることに快感を得るから」という自分の深層心理に潜む本当の欲求が見えてくる．すると，人を手玉に取るのなら，ロボットでなくても良いのでは?という疑問が湧いてくる．では人を手玉に取れる職って何だと考えると「プロデューサー」という職が出てくるのである．そして，確かに筆者は今までプロデューサー的な責任ある立場を好んで行動していることに気付くのだ．このプロデューサーという発想は，ロボットプロレスという形からは生まれてこない発想だと思う．

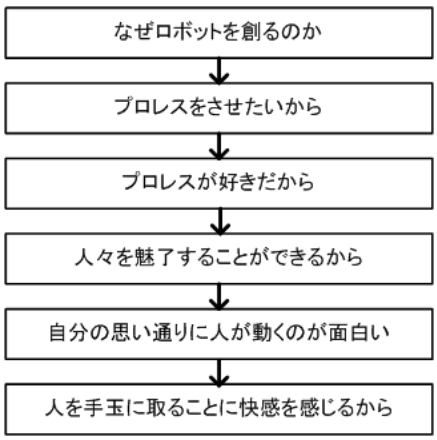


図 5･4　なんで論法による夢の本来の欲求

ここまで分かると自分の目標に対して，図 5･5 のように視野が広がってくる．このように視野が広がり，選択肢が定まって，はじめて大学で学ぶ技術が活きてくる．大学は様々な専門分野に特化したプロフェッショナルが集まる場所である．そこにはものつくりに必要な種（seeds）がたくさん潜んでいる．自分のやりたいニーズと照らし合わせて，その種を選ぶことができるのだ．

このようにトップダウンで自己を分析し，ボトムアップで視野を広げることが，自分のやりたいことを見付け，大学で学ぶ技術を効率良く活かす方法だ．

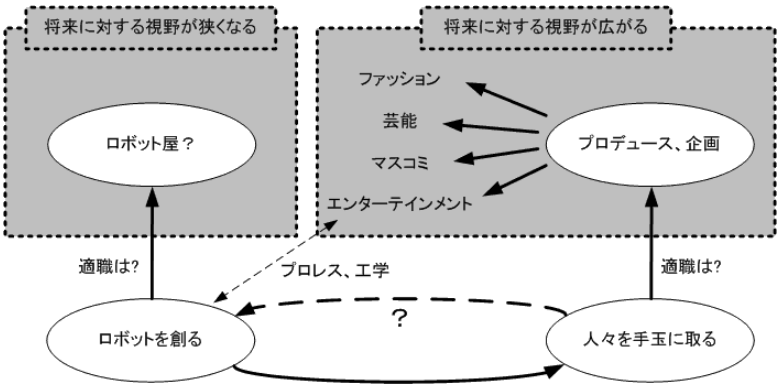


図 5･5　ボトムアップして将来への視野を広げる

［２］　自己責任下での情報選択

しかし，人間誰しも気持ちが揺らぐことがある．流行に流されるかもしれない，数ある情報の中に，より魅力的なものが詰まっているかもしれない，先生や先輩からの様々なアドバイスに感銘を受けるかもしれない．このように気持ちが揺らぐのは仕方がないことである．人の話に乗り，ヒョンなことで才能が開花するかもしれないし，無駄骨を折るかもしれない．しかしここで大切なのは，いかに自分でその情報（アドバイス）の良し悪しを判断し，責任を持って決断を下すかなのである．

ここで大事なのは“責任を持って”という部分で，ここを妥協して人の言いなりに行動していたら，いつまで経っても先輩を超えることはできないし，成長しない．例え人の言いなりに動いて失敗しても，自分の責任下で決断を下した末の結果なら，その行為は人を成長させるのだ．

ナベ☆ケンや研究室でも，自らの責任下で決断を下した人の論文と，先輩や先生の言うがままの研究をした人の論文の質には雲泥の差がでる．決断できない人は，研究が上手くいかないと，責任を他人に押し付け，ゆえに論文も無責任なものになる．別に先生や先輩の言うがままに行動することが悪いと言っているのではない．その選択を自分で下したなら，その後は自分の責任下で行動すべきであるということなのである．

［３］　数に落とす重要性

本当に自分のやりたいことが定まったら，それを数にすることで具体性が増し，明確な夢や目標を形作る．そこで必要となるのがデザインコンセプトである．コンセプトを決めることは，頭の中にあるアイディアの点を線で結ぶ作業で，構想をまとめるのにも役立つし，数に落とすことその構想の目標がしっかり見えてくる．こうすることによって，学ぶべき技術が見えやすくなる．

筆者はナベ☆ケンの中で，チームリーダーであると共に，機体設計を主に担当していた．そこでの実績が見込まれたのか，研究室内で活動している自律走行ロボット研究班（以下，ビークル班と略す）から，自律走行ビークルの車体設計を依頼された（図 5･6）．ビークル班は主に Intelligent Ground Vehicle

Competition（IGVC）での優勝を目指し，活動している研究班である．過去，同大会での優勝経験もあり，世界でもトップレベルの技術力を誇っている．

しかし車体設計は困難を極めた．なぜなら，各技術担当者同士の連結が上手くいっていなかったからである．カメラの位置はどのくらいの高さが良いのか，レーザーレーダは可動式なのか固定式なのか，電源や速度計の回路の大きさはどのくらいになるのか，誰に聞いても「担当がいないので分かりません」と言われてしまう．では担当者はどこにいるのかと尋ねると「知りません」と言われる．「形にしてくれればそれで良いから」と言われても，設計者としては，機構や大きさなどの車体仕様が分からないと形にすることはできない．

（a）3 次元 CAD による設計図　　（b）製作した車いす

図 5･6　IGVC 用に設計・試作した自律走行車いす

こうなった原因は，車体のデザインコンセプトを掲げなかったことにあると思う．デザインコンセプトを掲げることは，各担当者が持つ技術やアイディアを線で結ぶことで，チーム内に“共通意識”を持たせるのに有効な手段なのである．

ここでいうデザイン（design）とは，ものつくり全体の設計を指しており，筆者は主に以下の 3 つに分類する（図 5･7）．

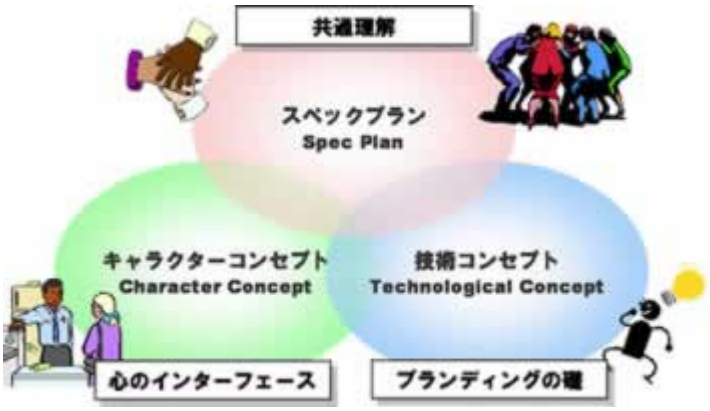


図 5.7　デザインコンセプト

▽ スペックプラン（Spec Plan）

チームとして目指す目標についてまとめたもので，仕様書になる．ものの大きさ，重量，使うセンサや材料を明記することによって，全員の共通理解を生む．

▽ 技術コンセプト（Technological Concept）

スペックプランを技術的に掘り下げていったもので，その技術特徴はブランディングの礎になる．これは技術者（個）の目標を明確にするもので，ここでいかに自分らしさを出すかで，もののブランドイメージが決まる．

▽ キャラクターコンセプト（Character Concept）

主に外装についてで，スペックプランで決めた性能や技術コンセプトで決めたブランドイメージを形に落とす極めて重要なファクターである．外装は技術者と消費者を結ぶインターフェースとなるので，ここで手を抜くと最終的なものの評価を落とすことになる．

数は各人が持つバラバラなイメージを 1 つの共通イメージに落としてくれる．例えば「スピードを速くしよう」というスペックプランを掲げても，そのイメージは人によって様々である．「スピードを 3km/h から 6km/h に上げる」と明確にプランを設定することで，チーム内に共通意識が芽生え，各担当の進行状況もつかみやすくなり，個々に責任感が生まれる．もちろん数でなく言葉でも良いのだが，“感性ワード”のようなファジーな意味合いの言語は控えたほうが良い．

しかし，技術は日々進歩し，好みも日々変化する．そんなとき，頑なに 1 つのコンセプトに執着していると，時代の流れに取り残される恐れがある．だからといって，その度にコンセプトを変更することは，逆にメンバーの混乱を招く．こういうときの判断は，チームリーダーがいかに「自らの責任下で決断できるか」に懸かっている．コンセプト変更は，プロジェクトそのものの方向性を変えてしまうため，その決定権を持つチームリーダーはかなりの重責を担う勇気が必要なのである．

５．５　どう個性を身に付けるか

［１］　「３ない」の克服

以前, ある高校へ出前講義に行ったときに, なぜ微分積分が必要なのかをロボットを例に話したら, 皆，感心して話を聞いてくれた．なぜ微分積分を学んでいるのか分からない，それが現在の教育の実状である．

図 5.8　ヒューマノイドロボットについての出前講義の様子

現在はインターネットが普及し，微分積分を知らなくても簡単に難題の答えを捜し求めることができる．そして，その答えだけを組み合わせ，あたかも筋が通ったかのようなロジックを組むことができる．

しかし，そのように作ったものはすぐボロが出る．なぜなら，彼等は成功例を真似ているだけで，

想定外の事態が起きると何もできなくなるからである．失敗学という学問を提唱している畑村は著書でこのようになる原因を「見ない，考えない，歩かない」の「３ない主義」にあると表現し，警鐘を鳴らしている．

筆者がナベ☆ケンで感じたことは，歩かない人が非常に多いということである．そこでナベ☆ケンでは ROBO- ONE の大会やイベント，ロボットの展示会などに必ずメンバーを誘い，自らの足で歩いて最新のロボットと触れ合わせてきた．また昨年は皆で愛知万博にも行き，多くのロボットや先端技術に触れてきた．

図 5･9　ナベ☆ケンでは様々なロボット展示会に足を運んだ

このように自らの足で現場に行き，現物に触れ，現人と触れ合うことで，その分野の最新情報やニーズを直に感じることができるのである．これは誰も教えてくれない最高の“生きた情報”である．

また歩くという行為は，モチベーションも向上させる．ナベ☆ケンでは必ずパーツを買わせに秋葉原まで足を運ばせる．すると時々，見慣れない工具や電子部品を使い始める人が出てくる．それが良いものであるかどうかはさて置き，この行為は非常に良い傾向である．彼は現地に行き，現物を見て，現人と話し，興味を惹かれたから買ったのだろう．それが例え使えないものであっても，使った経験というのは“生きた技術”になる．

このように身銭を切って稼いだ生きた情報や生きた技術は，どんな教科書にも載っていない，最高の教材となる．これはどんな外乱にも負けない，夢実現の強力な武器となり，その人のセンスとして備わる．情報収集や買い物をインターネットで済ませるのも良いが，歩いた人は常人にはないセンスを養い，個性（identity）が身に付く．

しかし歩くことを拒む人は，自分勝手な理論を展開し，体力を使わないシミュレーションに固執する上，妙にプライドが高い．なぜならインターネットやテレビや本で見る情報が全てだと思っているからだ．これではいつまで経っても予定調和を脱せず，現場（リアル）に対応できなくなる．だからと言って，こういったセンスのない人がいると困るかというと，そういう訳でもない．チームで活動している以上，欠点があれば，そこは誰かがカバーしてくれる．だから，歩くという重要性は伝わりにくい．

［２］　見習う（真似る）

生きた情報や生きた技術に触れたとき「見習う」（真似る）ことで自分のセンスに落とし込むことができる．「見習う」は文字通り，見て習うことである．自らの足で現場に行き，見て習うことで，そこから“生きた技術”を盗むことができる．人から聞いた情報や技術は直に忘れてしまう．しかし

盗んだ技術は，自分の技術（skill）以上にセンス（sense），あるいは本質（essence）として自分に備わる．

ものつくりというのは，創って終わりではなく，ユーザーがどのような気分やシーンで使用するのかという感性（kansei）の部分まで創り上げて，はじめて完成を迎える．こういった感性のセンスというのが生きた情報や生きた技術の本質で，これらは自らの足で歩いて，見て習わなければ身に付かないものなのである．そしてそれは，経験を重ねることでオリジナリティに変化していくのである．

［３］　道具

自腹で道具を買わない人間，道具を粗末にする人間は上達が遅い．誰もが始めは素人で，下積み時代があった．下積み時代は先輩が持っている道具に憧れ，それを手に入れると嬉しくなるものであった．嬉しくなるとモチベーションが上がり，自発的な行動が取れるようになる．

自腹で道具を買うことで愛着や責任感が湧く．すると道具を粗末に扱えなくなる．どうしても人から借りた道具というのは大事に扱えないし，自分と他人では癖が違う．だから，筆者は道具を人に貸すのが好きではない．

また，手入れをしない道具と手入れをした道具では，使ったときの印象が全然違う．この印象というのが生きた技術になる．例えばニッパーは，主に銅線を切る道具である．しかし粗末に扱う人間は，ニッパーで金属板を切ろうとする．ニッパーは金属板を切るものではないので，無理矢理切ろうとすると刃がボロボロになる．こういったニッパーと手入れが行き届いたニッパーでは使った印象が違う．スパッとガリッ，この感覚が生きた技術になる．

スパッときれいに切れると，やる気が上がり，質の良いものができる．ガリッと切れ味が悪いと，いい加減な気持ちになり，質の悪いものができる．スパッとガリッという「ものとの対話」が質に現れるのである．だから，良い道具を使えば良い仕事ができるというのは一概に否定はできないと思う．

５．６　いかに個性をチューニングするか

［１］　失敗させる

ものつくりを始めると必ず失敗をする．これは決して悪いことではない．むしろ，失敗してはいけないという考えの方が危険だ．世の中に壊れないものはないし，そこに人間が絡む以上，必ず失敗は起きる．「俺の作ったものは絶対に壊れない」と思っていると，いざ想定外の事態が起きたときに，リカバーする行動が取れなくなる．絶対に壊れないと考えたり，失敗を極端に恐れたりする人は，小さな失敗（fault）でも，それが火種となって致命的な失敗（failure）にまで発展させてしまう恐れがある．

大事なのは致命的な失敗を犯さないことである．定期的にメンテナンスを行う，失敗をしても素早い処置が施せる．こういったことで致命的な失敗は防止できる．これができる人は練習や訓練を繰り返し，日々愚直に努力を重ねている．つまり，語弊があるかもしれないが，失敗できる人間は，失敗しても素早く対応できるので，指導者から見ると頼りになる存在なのである．

一方，失敗しない（できない）人間は，失敗しても対応できず，指導者の立場から見ると非常にこわい存在になる．こういった人間は自らの責任下で行動できない人間や歩かない人間に多い．なぜなら自分に対してプライドが高いので，「失敗=恥」と捉えてしまうからだ．こういった人達には，タイムリミットが有効的に働く．

試験勉強を一ヶ月前，一週間前からやる人はあまりいないと思う．精々，前日か一夜漬けが良いところか．一ヶ月前は，先生が問題の出題範囲を教えてくれるのでは?という淡い期待がある．一週間前は，誰かが過去問題を持ってくるのでは?という淡い期待がある．そういった効率的な手段があるのにガリ勉するのは，格好悪いと変なプライドがあるからだ．しかし，前日になっても過去問題が回ってこないと，焦り始め，どう試験を突破するかに頭が切り替り，真の意味での能力や創造性が試される．

誰しもこのような経験があると思うが，締め切り間際というのは，プライドを捨てることができ，自分でもビックリするほどの集中力や創造力が湧いてくる．もちろん，一日や二日で乗り切れるほど試験は甘いものではない．だからこそ，こういった痛い経験をすることによって，自分の責任下で決断ができるようになり，歩く重要性を知ることができるようになるのだ．

ナベ☆ケンでは，新メンバーに対して，その人の能力以上の無理難題を与えることで，無理矢理失敗させたり恥をかかせたりするようにしている．ものを実際に壊すように仕向けたり，自分で身銭を切ったものが壊れるように指示したり，他人に迷惑を掛けるように行動させたりする．これはかなり手荒な手法かもしれないが，時間が限られた学生生活において，効率的な指導方法だと思っている．もちろん，こちらもそれなりのリスクが伴うが，致命的な失敗を起こすことを考えると，安い先行投資である．

しかし中には，そつなく作業をこなしてしまう人もいる．それはそれで大変素晴らしいのだが，やはり指導者から見ると，失敗をしない人（俗に言う優秀な人）はプライドばかり高くなり，いざというときに適切な判断ができなくなる恐れがあるのでこわい存在になる．そこで，そういった人には「いついつまでに完成させてこい」とこれまた無理な期日を設け，失敗するまでそれを繰り返す．酷い方法かもしれないが，これだけ才能がある人間が失敗に対するプライドを捨てることができたら，真の意味での優秀な人間にステップアップすることができるのだ．

もちろん，人間それぞれ十人十色である．チーム状況を冷静に見つめ，各メンバーの性格を把握し，それぞれに適切なタイムリミットを設定する必要がある．

しかしここで重要なのが，無理難題に果敢に挑んだ末の失敗を責めないことである．特にチームで活動していると，1 人 1 人に役割が与えられ，それに対する責任（プレッシャー）も重くなる．失敗が起きると必ず責任追及が始まる．失敗を犯した人に責任を取らせることも大事かもしれないが，重要なのはその失敗の原因を曖昧にせず，いかに教訓として次に活かして行き，その人をチームの強力な戦力に育て上げていくかである．失敗を経験した人には，生きた技術が身に付き，必ず後にチームの強力な戦力となる．つまり，失敗はチャンスであるということに気付かせることが重要なのである．

［２］　計画性

しかし，タイムリミットがあるために過度の焦りをよび，しなくて良い失敗を連発することがある．だがそういったことは，経験を重ねていけば時間の使い方や計画性を学び，改善していくことができる．

しかし，多くの学生と接していると責任感などからくる過度の焦りではなく，自分であれやこれやと仕事を増やし，焦ってどれも中途半端に終わる人が多いことに気付く．つまり，部活やバイト，恋愛といった自分の夢とは違う欲求（外乱）が多いのである．自分の夢も部活もバイトも恋愛もダメになる．これでは，あまりに悲しい．

こういったことは，優先順位を設け，上手く時間を回すよう計画を立てることで，全てが中途半端といった致命的な失敗を回避できる．そのためにも，立てた計画に沿うよう自分をコントロールし，

メリハリを付けることが必要になる．これも一つのセンスであろう．

第 8 回 ROBO-ONE で岐阜県高山市に遠征に行ったとき，次のようなことがあった．ナベ☆ケンが初の ROBO- ONE 決勝進出を決めた日の晩，翌日の決勝トーナメントに向けてモーションの調整を進めていた．しかし，夜中になると次々とメンバーが寝てしまい，結果，起きているのは筆者 1 人だけになってしまった．結局，最後まで筆者 1 人でモーション調整を行い，試合に臨むことになった．

図 5･10　第 8 回 ROBO-ONE の様子

ここで何が言いたいのかというと，呑気に寝てないで調整しろよ，と言いたいのではない．寝ることは悪くない．ただ，皆が同じ時間に寝てしまうことが問題なのだ．7 人もいるのに 6 人 1 人のシフトで作業を回していたら，作業効率が落ち，何のためにチームで行動しているか分からなくなってしまう．

もちろん，最大の原因は筆者の指導力不足であるのは明白なのだが，チームで活動する以上，「All for one．One for all.」の精神で，それぞれが先を見越した“皆が 1 人のための”“1 人が皆のための”行動をとって欲しかった．今が良ければそれで良いという考えは否定しない．しかし，タイムリミットが設けられた以上，計画を立て，自分をコントロールしていく必要があるだろう．

図 5･11　組織で動くにはチームワークが重要

［3］　ギリギリまで頑張らない

適切なタイムリミットを設けても致命的な失敗を犯してしまう人のいけないところは，時間ギリギリまで頑張ってしまうことである．

昨年 8 月に開催された第 5 回 ROBO- ONE J-class は，ナベ☆ケンの中で筆者を除く 4 年生中心のプロジェクトであった．4 年生はナベ☆ケンに来てまだ半年しか経っていなかったが，身を持って失敗

の痛みを経験してもらおうと，思い切って 4 年生中心にロボット製作をさせてみた．案の定，皆は失敗を繰り返し，作業が全くはかどらず，悩み苦しんだ．デザインコンセプトも計画書もただの理想論になり，当時のチーム状況はかなり悪かった．

特にマイコン班は進捗状況が悪く，担当者は焦っていた．完成してもモータは動くか分からない，歩行プログラムも動くか分からないなど不確定な要素が多かったが，初の自作での出場を夢見て，担当者は大会の日が迫っても「完成させる，完成できる」と決して諦めなかった．

しかし大会前日の夜になってもマイコンは完成せず，大会当日に急遽使い慣れた市販品のマイコンで出場することになった．大会当日に突然のスペック変更を余儀なくされ，ロボットは継ぎ接ぎだらけなものになってしまった．もちろん，満足なパフォーマンスができなかったのは想像に難くない．

この場合，結果論ではあるが，マイコン担当者とプロジェクトリーダーは自分達の能力や性格，周りの状況と相談して，いつ使い慣れた市販品マイコンにシフトするかを見定める必要があった．妥協することは決して良いことではないが，チームは「All for one．One for all.」という言葉に代表されるように，個の影響力が大きい．どこで妥協して，いかに致命的な失敗を回避するか，最小限の失敗に止めるか，こういった決断をどこで下すかもその人の持つ貴重なセンスであろう．

［４］　遊び先行の怖さ

第 5 回 ROBO-ONE J-class の話ついでに，今ナベ☆ケンで最も心配なことについて述べようと思う．同大会用ロボット「ボブ 4413#」は，大会直前にドタバタしたものの，顔を本物のパンにしたアンパンマンを模したロボットで，大変好評を博した．キャラクターコンセプトが大当たりした格好である．

しかし，メンバーには申し訳ないが，先に述べたように突貫修正を加えたこのロボットはスペックや技術レベルが少々低い．だが，キャラクターインパクトが強かったため，非常に大衆ウケが良かった．多くの人から注目を浴び，雑誌にも掲載され，メンバー一同非常に喜んだ．

（a）正面　　（b）側面　　（c）背面

図 5･12　ボブ 4413#の内部構造

しかし，これはあくまでキャラクターによる戦略がヒットしただけで，技術視点から見ると，喜ぶべきロボットではない．「技術者になりたい」と公言するメンバーが多い中，キャラクター先行の人気に“技術者としての本来の役割”を見失っていないかが非常に不安なのである．

ナベ☆ケン自体，プロデューサー気質の筆者がチームリーダーであるせいか，キャラクターや宣伝活動に力を注いでしまう．そのため多少の粗悪品もキャラクターの力でカバーしていたのである．ものつくりにおけるキャラクターのポジショニングには，今も悩まされている．

５．７　いかに個性を確立するか

［１］　考察は教訓を生む

いまの学生は，喋りは上手いが論理性がない．ロボット基礎実験のレポート（Word，PowerPoint で提出）でも，Word の方は書き方を厳しく指導したが，ビックリするほど論旨が目茶苦茶なのだ．しかし PowerPoint の方は，形式や枚数は問わないので，自分がやったことを自由に表現してきて下さいと指示を出したところ，端的かつ面白くストーリー立てて表現してくるのだ．中には写真 2，3 枚で上手にまとめてくる人もいて感心させられた．

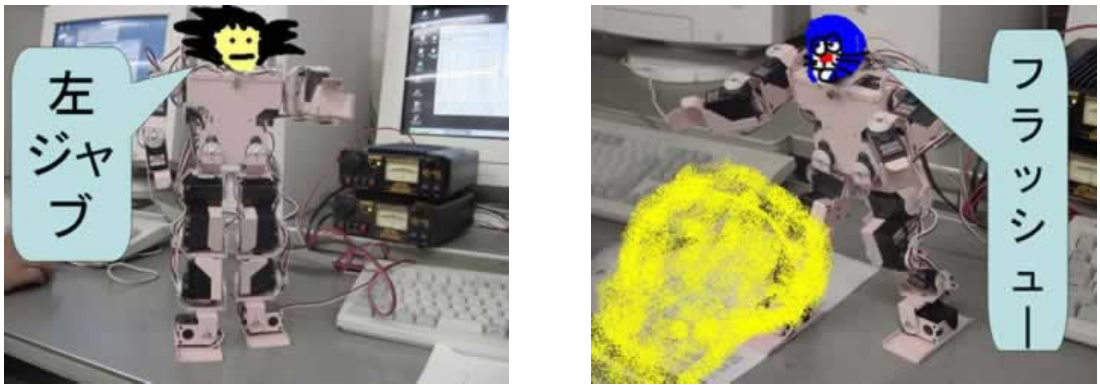


図 5･13　ロボット基礎実験のレポート（PowePoint から抜粋）

この 2 つのレポートのギャップは漫画の影響ではないかと筆者は感じている．漫画を読むことで論理性や表現力は体に染み付いているのだが，それを俗語（slang）や絵（painting）でなく，雅語（refined diction）や図（illustration）に落とす事ができないのだ．もしくはこちらが発する雅語の意味が理解できていないのかもしれない．

また「企画書通りに行かなかったのですが，レポートには何を書けば良いのですか」とか「実験失敗したので企画書を書き直しちゃっても良いですか」と耳を疑うような質問を何度も受けた．実験は予定調和なものではない．レポートはただの報告書ではない．「自分がやってきたことを他人に理解させる」ものである．

例え失敗しても，“なんで”失敗したのかを言葉にすることで教訓が生まれる．そして論理的に考えることで，解決法が見えてくる．それを行う工程が考察（consideration）であり，実験の度にレポートを書かされる所以なのである．とりあえずレポートを出せば単位が取れるという風土がいけないのか，予定調和の実験がいけないのか，考察がただの比較作業となっている．折角，遊ぶことで”Why?”を感じ，議論しあって，モチベーションも上がったのに，企画書と実験結果を比較するだけで，予定調和に終わらそうとしては，何も得ることができなくなってしまう．

何も考えずに遊べば，ただの遊びにしかならない．しかし，遊びも真剣に考えることで，多くの教訓や技術課題を得ることができる．教訓は言わば「悟り」のようなもので，その人の個性を決定付ける．これまでのような予定調和の実験は，考察させず，失敗を教訓にすることを妨げ，個性を消してしまうので危険である．

［２］　プレゼンテーション

ものつくりにおいてその価値は，自分が何をしてきたのかを相手に伝え，どのような評価を受けるかによって決まる．価値は創り手が決めるものではなく，相手が決めるものである．先にも述べたが，

ものつくりというのは，創って終わりではなく，ユーザーがどのような気分やシーンで使用するのかというイマジネーションの部分まで創り上げて始めて完成を迎える．

プレゼンテーションとは，ユーザーとの共感，共通理解を作るための手段で，伝え方を誤れば，その時点で評価は一変する．どんなに社会的に有用なものを創っても，ユーザーに評価されなければ意味がない．言わば，ものつくりの最終関門なのである．

プレゼンテーションの場では周りの目が，自分という個に集まる．しかし，その目は“群の中の個”を見ているのではなく，“群という個”を見ているのだ．群の中で自分が一体どういう役割を果たして，群としてどうニーズを実現したかを冷静に判断する必要があるのだ．そのため，群のニーズと個のニーズの違いをはっきりと理解しておく必要がある．

図 5･14　オープンキャンパスでのプレゼンテーションの様子

そして，プレゼンテーションする相手と自分の関係をしっかり把握しておく必要がある．相手がエンドユーザー（一般大衆）か専門家（先生）かでニーズが変わり，伝え方も変わってくる．プレゼンテーションではいかに相手に理解させ，伝わる言葉を選ぶかが大事なのである．言葉の意味の本質を見極め，自分でなく相手がどう思うかを考えた上で，自分の知識を“言葉に落とす”必要があるのだ．

また，TPO（Time，Place，Occasion）をわきまえる必要もある．相手が一般大衆の場合，感性レベルでのやり取りで，敏感に反応するのが外観，キャラクターである．つまり，デザインコンセプトでどんなキャラクターコンセプトに設定するかでプレゼンテーションの方向性は決まるのだ．

（a）予選ではかなりのインパクトを与えた　（b）決勝ではキャラクターを存分に活かした

図 5･15　ボブ 4413#（第 5 回 ROBO-ONE J-class 時）

本論でものつくり対象をヒューマノイドロボットにしたのも，工学に興味を惹かせるためであった

し，先の第 5 回 ROBO-ONE J-class のボブ 4413#で顔を本物のパンにするというのも観客の目を惹くためであった．こういった TPO に対応した感性レベルのニーズは，とにかく自らの足で情報を稼がなければ，その嗅覚は研ぎ澄まされない．

このように，プレゼンテーションを成功させて見事夢を実現する人間というのは，技術だけでなく感性レベルのニーズまで捉えることができる広い視野も持つ「総合力」のある人間だけである．そういう意味でもプレゼンテーションという場は，現在自分に何が足りないのか，自分自身を考察する（見つめ直す）良い機会なのだ．

５．８　２足歩行ロボット製作事例

以上のような方法を用いて，学生が作り上げた 2 足歩行ロボット「コヴァ専用かじろう」（以下，かじろう略す）をここで簡単に紹介する．

［１］　デザインコンセプト

ロボットの製作にあたり，はじめに行うのがデザインコンセプトの設定である．かじろうのデザインコンセプトは，チーム内で議論を重ねた結果，「ROBO-ONE 優勝」と「オリジナルキャラクターで誰もやらないことに挑戦」に設定した．このようなコンセプトのもと，技術コンセプト，キャラクターコンセプト，スペックプランを次のように定めいった．

（ａ）　技術コンセプト

かじろうにおける技術コンセプトを図 5･16 に示す．ここで 1 番のポイントは，自律防御機能の搭載で，この機能はまだ ROBO-ONE では実現されていない機能であり，「誰もやらないことに挑戦」というコンセプトの柱になる．

また，ROBO-ONE には予選デモンストレーションと決勝トーナメントがあり，予選のデモンストレーションの結果，上位 32 台のロボットが翌日の決勝トーナメントに進めるシステムになっている．つまり，ROBO-ONE で優勝するためには，予選を通過しなければならないのである．予選デモンストレーションでは，毎回「規定演技」というもの定められ，これを行わないと予選を突破するのは難しくなる．本機体を製作するにあたって，規定演技は「走行」と決められていたので，まず走ることができる機体を作る必要がある．

この 2 つを大黒柱とし，技術班を「設計」「電装」「ソフト」「操縦」の 4 班に分けて開発していくことにした．

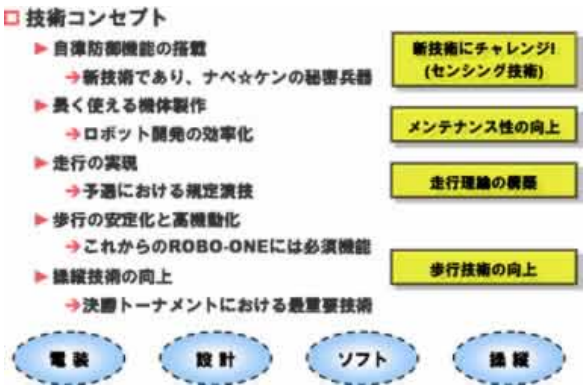


図 5･16　かじろうの技術コンセプト

（ｂ） キャラクターコンセプト

ROBO-ONE は他の競技会と違い，勝ち負けより「エンターテインメント性」を重視する．そのため，ただ強いだけでは上位には進めない．今まではアニメキャラクターを模したロボットが多く参加していたが，版権使用の理由から，第 9 回大会から ROBO-ONE 委員会の許諾を得ていないアニメなどのキャラクターを模したロボットの出場は禁止となった．

ナベ□ケンでは，今までアニメキャラクターを模したロボットにこだわって製作してきたので，路線変更を余儀なくされた．オリジナルキャラクターを決める話し合いは，ナベ□ケンでも良く用いるブレーンストーミング（brainstorming）法を用いて決めていった．その結果，最終的に

(C1) パッと見て分りやすく，可愛らしいキャラクター

(C2) 老若男女に受けの良いキャラクター

(C3) 規定演技の走行にマッチしたキャラクター

(C4) 自律防御機能に必要なアタッチメントをカモフラージュできる服を着用する

という 4 項目が残り，議論を重ねた結果，キャラクターコンセプトを「運動会の鼻垂れ小僧」とした．

運動会というのは，規定演技の走行をイメージさせるものであり（C3）を満たす．また，体育着を着用させることで（C4）も満たすことができる．そして，鼻垂れ小僧というのは，パッと見て分りやすい上に，可愛らしく，母性本能をくすぐるものがある．さらに，小さい子供というのは高齢の人に「孫」を連想させ，（C1）や（C2）を満たすものと考えた．

（ｃ） スペックプラン

以上の，技術コンセプト，キャラクターコンセプトから，かじろうのスペックを表 2･2 のように定めた．スペックに定められた数字は，緻密な構造計算や解析によって求めたものではなく，経験によるところが大きい．

ポイントは，走行のために機体を軽量化すること，自律防御機能を実現するためにセンサ類を搭載することである．また，スペックプランを定める上で，「ファジーな言葉」や「感性ワード」を用いると，チームにまとまりがなくなるので，極力避けた．

表 2･2　かじろうのスペックプラン

身長（頭を除く）	350mm 以下
重量（洋服を除く）	2000g 以下
自由度	21 （脚: 6*2, 腰: 1, 腕: 4*2）
アクチュエータ	KRS-2350HV ICS Red Version（近藤科学）
センサ	ジャイロセンサ *2（GWS） 加速度センサ *1（KONDO） コンデンサマイクロフォン *1（プリモ） 測距センサ *1（シャープ）
マイコン	モーションプロセッサ（近藤科学）
バッテリ	リチウムポリマー サヤン ETI 7.4V2200mAh *2（直列）

コントローラ	KRT-2（近藤科学）
材質	A5052（1.5mm, 1.2mm, 1.0mm） A1100（1.5mm，足裏に使用） （ランドセル部分は樹脂）
ネジ	M3（チタン製六角穴）, M2（十字穴）
配線材	ジュンフロンロボットケーブル （潤工社） 高屈曲ワイヤ（東京特殊電線）

［２］　ハードウェア構成

以上のようなデザインコンセプトのもと，製作したかじろうを図 5･17 に，そのスペックを表 2･3 に示す．ほぼ，スペックプラン通りに製作することができ，軽量化も実現できた（しかしながら，洋服の重量を加味すると，重量は前機体と変わっていない）．

図 5.17　製作したかじろう

表 2･3　かじろうのスペック

大きさ（頭部込み）	H: 441mm，W: 230mm，D: 138mm
重量（洋服込み）	1990g（2200g）
自由度	21 （脚: 6*2, 腰: 1, 腕: 4*2）
アクチュエータ	KRS-2350HV ICS Red Version（近藤科学）
センサ	ジャイロセンサ *2（GWS） 加速度センサ *1（KONDO） コンデンサマイクロフォン *1（プリモ） 測距センサ *1（シャープ）
マイコン	モーションプロセッサ（近藤科学）
バッテリ	リチウムポリマー サヤン ETI 7.4V2200mAh *2（直列）
コントローラ	KRT-2（近藤科学）
材質	A5052（1.5mm, 1.2mm, 1.0mm） A1100（1.5mm，足裏に使用） （ランドセル部分は樹脂）

ネジ	M3（チタン製六角穴）, M2（十字穴）
配線材	ジュンフロンロボットケーブル （潤工社） 高屈曲ワイヤ（東京特殊電線）

（ａ） 大きさ・重量

かじろうでは軽量化にあたり，機体をコンパクトに設計するように心掛けた．また，材料も今まで用いていた板厚が 1.5ｍｍのアルミ板から，板厚 1.2ｍｍのものに変更し，軽量化を図った．また，配線やネジに関しても，部品点数が多いので，軽量化すべき点である．

また，バッテリも軽量化においては重要な部品である．かじろうには小型・軽量で大容量のリチウムポリマー電池を使用している．リチウムポリマー電池は扱いに多少注意が必要となるが，その大きさや重量，容量は他の電池に比べ，非常に魅力的なものである．

（ｂ） 自由度

図 5･7 に，かじろうの関節の自由度構成を示す．片脚の自由度 6 の内，股関節のロール軸とピッチ軸の 2 自由度，足首関節のロール軸とピッチ軸の 2 自由度は直交軸構成になっている．これは，逆運動学計算を簡単にするためで，同計算を簡略化するために，股－膝と膝－足首の長さも同一に設計されている．

また，腰に自由度を確保しているのは，格闘の際に腰の入った攻撃を行うためで，軽量のロボットが ROBO-ONE で勝ち抜いていくためには，必要な自由度のように思う．

（ｃ） アクチュエータ

アクチュエータにはラジコン用のサーボモータを使用している．しかし，現在はラジコン用とはいいつつ，ホビーロボットの市場が開けてきたことから，ロボット専用のサーボモータを開発する企業が増えてきている．

ロボット専用のサーボモータは，他のホビー用のモータと比べると若干高価ではあるが，小型・軽量で，トルク，スピードも増し，かなり使いやすいものになっている．また，モータの特性を 1 つ 1 つ変えられる機能も備えている．かじろうには，近藤科学の KRS-2350HV ICS Red Version（図 5.18）を全関節に使用した．

図 5･18　KRS-2350HV ICS Red Version（近藤科学）
（重量: 57g，寸法: 41×38×20mm，トルク：29.5kg・cm スピード：0.13sec/60°（9V 時））

（ｄ）　センサ

ROBO-ONE を勝ち抜いていくためには，ロボットの姿勢制御がもはや必須なものとなっている．かじろうでは，ジャイロセンサを使用し，姿勢制御を行っている．また，加速度センサを用いた転倒検知機能も取り入れている．

これらのセンサに関しては，他の参加者も多く使用しており，これからはいかにこれらのセンサを融合して使用していくかがポイントとなるだろう．

（ｅ）　コンデンサマイクロフォン

コンデンサマイクロフォンは，かじろうの特徴である自律防御を行うためのセンサである．コンデンサマイクロフォンは，マイクであると同時に，音の圧力を検知する圧力センサでもある．そこで，図 5･19 のようなシステムを用いて，コンデンサマイクロフォン 1 つで簡単に，全方位からの攻撃を感知することが可能となる．

シリコンチューブをかじろうの洋服に埋め込むことで，見栄えを損ねることなく，自律防御を実現することができる．

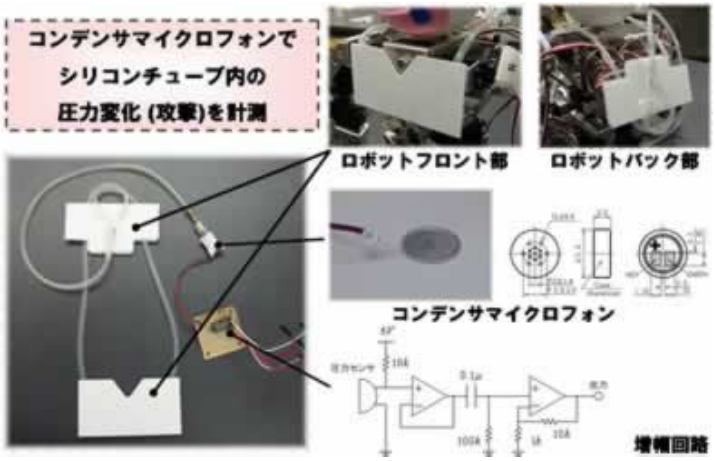


図 5･19　自律防御システム

［３］　ソフトウェア構成

ナベ☆ケンでは，3 次元 CAD に「Autodesk Inventor」，移動系プログラム作成に「MATLAB/ Simulink, Stateflow」，構造解析や機構解析に「visualNastran4D」を使用している．Autodesk Inventor で製作した図面と MATLAB/ Simulink，Stateflow で作成した歩行プログラムを visualNastran4D 上に渡して，構造解析や機構解析を行い，その結果をロボットに組み込んでいる．

ナベ□ケンでは制御プログラムをマイコンに実装しているのではなく，あくまで角度データを排出してマイコンに組み込んでいるので，これらソフトを用いてモーションエディタ的な使い方をしている．もちろん将来は，モデルベース開発（MBD）を実現していきたいと考えている．

（ａ）　Autodesk Inventor（図 5･20）

ここで，かじろうの設計を行う．3 次元 CAD は 2 次元 CAD と違い，特別な専門知識を要さなくても直感的に設計が行えるので，便利なソフトである．干渉チェックや重量，重心位置まですぐに求めることができ，設計効率を上げることが可能となる．

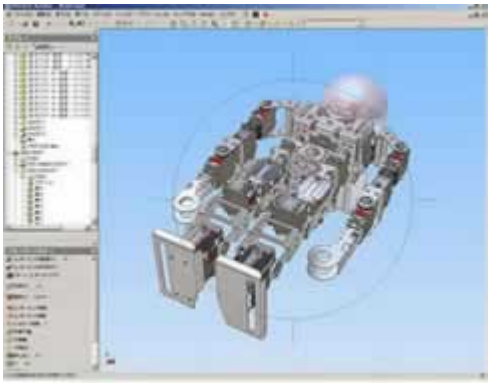


図 5･20　Autodesk Inventor

（ｂ）　MATLAB/ Simulink, Stateflow（図 5･21）

MATLAB は制御系設計ソフトとしてはスタンダードなものである．この MATLAB を用いて，逆運動学計算や歩行軌道生成などの計算を行い，歩行系プログラムを作成する．また，GUI 機能にも長けており，様々なデータを可視化することができ，スムーズな開発を実現してくれる．

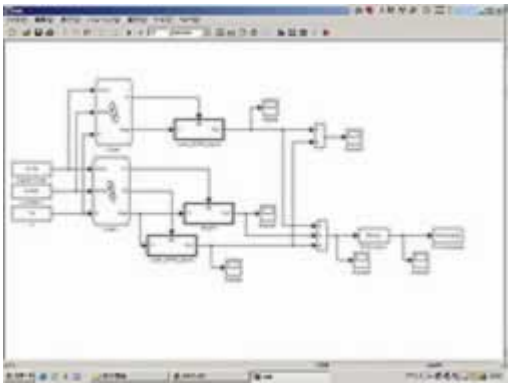


図 5･22　MATLAB/ Simulink, Stateflow

（ｃ）　visualNastran4D（図 5･22）

visualNastran4D は主に，機体の構造解析や機構解析に使用する．Inventor 上で設計したロボットが歩行した際，どこにどれだけの負荷がかかるのか調べ，MATLAB で設計した歩行プログラムが正常に動作するかなど，シミュレーションするのに非常に便利である．このソフトのおかげで，ロボットがそばになくても開発を進めることができ，スピーディーなロボット開発が可能となった．

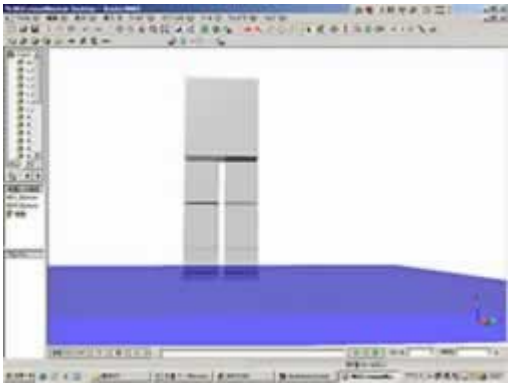


図 5･22　visualNastran4D

（ｄ）　モーションプロセッサ（図 5.23）

モーションプロセッサは，マイコンやプログラミング言語を知らない人にも使えるように開発された，ロボット専用のマイコンである．これにより，高度なプログラミング知識を要することなく，ロボットを動作させることが可能となっている．また，強力なスクリプト言語を備えており，簡単にセンサ類を使用した自律動作も実現することが可能となっている．

図 5･23　モーションプロセッサ（近藤科学）

謝　辞

本論文をまとめるにあたり，渡辺嘉二郎教授，小林一行助教授をはじめ，多くの先生方に御指導，御助言をいただきました．ここにお礼を申し上げます．

また，ナベ☆ケンのメンバーとして長きに渡り，本論文のサポートをくれた伊藤厚君，門脇裕司君，久保田淳一君，斉藤翠君，蛭田知樹君，一色宣孝君，小澤登喜子さん，川辺雄司，寺田智江さん，平井辰徳君，青木潤也君，芦ヶ谷宏樹君，大城貴仁君，三穂悠介君，宮川到君をはじめ，その活動を支えてくれた皆様，そして本研究室で 2 足歩行ロボットという研究基盤を築いていただいた榎本浩也先輩，西谷泰昭先輩には，非常に感謝しております．

そして，3 年間に渡り，ロボットの板金加工をサービスで行ってくれた父親と，それをサポートしてくれた東京製鎖株式会社の従業員の方には，本当にお世話になりました．ここにお礼を申し上げます．

株式会社バンプレストの大友克己氏，本田博之氏，株式会社ベストテクノロジーの津藤智氏には，2 足歩行ロボットに関する技術や情報，また富山で行われたジャパンロボットフェスティバルに参加させていただくなど，数多くの経験を積ませていただき，本当にありがとうございました．ここにお礼を申し上げます．

また，5.8 章 2 足歩行ロボットの製作事例で，第 9 回 ROBO-ONE 用ロボット「コヴァ専用かじろう」の服飾を担当してくれた，上田幸さんとそのご家族の方々，本当にありがとうございました．

最後に，私をここまで育て上げ，私の学生生活もサポートしてくれた私の家族に感謝します．ありがとうございました．

感　謝

私のロボット研究活動はたくさんの人達に支えられました.

◇　渡辺先生，小林先生，笹野先生，伊藤先生

先生方には，このような論文にもならない，ただのロボット遊びを黙って見守り，さらに莫大な金銭の援助までしていただき，本当に感謝しております.

渡辺先生には，オープンキャンパスやデモンストレーション，出前講義など数多くのプレゼンテーションの場を与えていただきました．間違いなくこの経験は，将来に活かすことができると信じています.

小林先生には技術的な相談や金銭的相談，実験環境の整備など，基盤を支えていただきました．また，先生のバグ出し作業は見るだけで勉強になり，見習う大切さを学びました．ありがとうございました.

しかしながら，こういた指導や莫大な投資の結果，これといった成果を残すことはできませんでした．この点はお詫びします．しかし，ここで学んだこと，ここで積んだ経験は確実に私のスキルとなりました．学生でいる間，先生方に恩は返せませんでしたが，数年後に何か形として，絶対にその成果を社会に還元して行きますので，それまでいましばらくお待ち下さい.

また，笹野先生や伊藤先生には TA のロボット基礎実験を自由にやらせていただき，非常に感謝しています. このロボット基礎実験で, 私はロボットに対する感性を研ぎ澄ますことができました．ロボットに関わる者として忘れかけていた，初心の気持ちを学生達とふれ合うことによって，呼び覚ますことができました．これも，実験を自由にやらせていただいたお陰だと思っております．ありがとうございました.

◇　ナベ☆ケンのメンバー

ナベ☆ケンの皆, こんなヘナチョコ先輩のわがままに付き合わしてしまって, すみませんでした.

斉藤，蛭田．2 人は今後どうしていくかよく分からないけど，2 人は職人さんとして，よく頑張ってくれました．ありがとう．斉藤はシミュレーション，蛭田はマイコンを武器に今後も頑張って下さい．一色は，ROBO-ONE oc PC で本当に頑張ってくれました．ただ，研究と私生活にメリハリがつけられれば，君はリーダー的存在になれるはずです．頑張って下さい．小澤は，やっぱり女の子でした．アンパンは傑作でした．あのアンパンあってこその ROBO-ONE J-class ベスト 16 です．ありがとう．あのアンパンは一生私の記憶から抜けないと思います．川辺は，技術で皆を引っ張ってくれました．感謝しています．また，自分の想いをしっかり口に出してくれるので，その点は凄く嬉しかったです．君なら，その性格までディジタル化した切り替えの速さで，難を乗り越えられると思います．寺田は，本当によく頑張ってくれました．本当にありがとう．努力の天才が本当の天才です．君は確実に私の記憶に残る人物です．その美貌と男勝りのド根性で，上手く世を渡って行って下さい．ナベ☆ケンは任せた! 平井には，本当に公私共にお世話になりました．ありがとう．平井がいてくれることで, 私も安心して卒業できます. そのスマートさで, 自分の夢をつかみ取り, 真の隊長になって下さい.（よく分からないだろうけど）平井は私のライバルです．変なところで挫けたら許しません．いつかもっと高いレベルで争える日を楽しみにしています.

榎本さん．榎本さんのマイコン技術は，何とか蛭田から川辺と繋ぎ，今，その後輩へと受け継が

れていっています．それほど技術が向上したわけではありませんが，榎本さんの力なしにはここまでのレベルには到達できませんでした．ありがとうございました．西谷さん．西谷さんが 1 人で作った 4 足歩行ロボットを見ると，今でも本当に素晴らしく思います．西谷さんが，手作りでここまでできるのだということを，体を張って見せてくれたおかげで，ものつくりの良い勉強ができました．ありがとうございました．門脇は，ナベ☆ケン創世時代の立役者として，本当によく頑張ってくれました．君の MATLAB 技術がなかったら，今頃 ROBO-ONE に出場できていなかったと思います．君の技術は確実に後輩達に継がれ，力になっています．本当にありがとう．久保田は，色々と切迫している中，ボブの設計をやってくれてありがとう．様々な葛藤があったと思うけど，いまの久保田の表情を見ていると，頑張って設計を教えたのも無駄じゃなかったのだな，と嬉しくなります．これからも，自分の夢を目指して頑張って下さい．

青木は，留年するかしないかの瀬戸際で，時間を切り詰めてロボットの作業をしてくれてありがとう．今後はナベ☆ケンで，携帯電話を使って思う存分暴れて下さい．芦ヶ谷も，忙しい中，時間を切り詰めてロボットの作業をしてくれてありがとう．その志があれば，きっと夢は叶います．ただ，学んだマイコン技術はしっかり後輩に伝授してから卒業して下さい．大城は，平井と同じく，どう転ぶか分らない風貌だけど，設計をやってくれるということで，非常に感謝しています．私の後を継ぐということは, どういうことか分かっていますよね?きっと君は化けます. 期待しています. 三穂は，ナベ☆ケンにくるのが少し遅かったけど，その真面目さがあれば，将来重鎮になれます．ありがとう．宮川は，いち早くナベ☆ケンにきてくれて，凄くありがたかったです．歩行技術はロボットの要です．きっと君の力で，ROBO-ONE を優勝に導くときが来ると思うので，それまで耐えて頑張って下さい．耐えることが大事です．

◇　研究室の皆さん

同期の糟谷，真鍋，森，吉川，大島，宮崎，楽しい研究生活をありがとう．

特に徹夜等で，同じ時間を過ごすときが多かった真鍋には，人間交際において，「臭い」「寒い」「滑る」の負方向の大切さを教えていただきました．今後の糧にしていきたいと思います．ありがとう．

吉川は，ゼミ長として長い間，研究室を支えてくれてありがとう．あと，どこで調べたか分らないけど，その情報通っぷりは感嘆に値します．体に気をつけて，これからもブツブツと毒を吐いていて下さい．

また，森，宮崎，樽床，小竹，山内をはじめとするビークル班の人達には，ビークル設計のときに色々と迷惑を掛けました．でもロボットだけでなく，車いすの設計をできたことは，私にとって大きな経験となりました．ありがとう．ただ，私なりに一生懸命作った車いすです．粗末に扱うようなら，いつでも説教しにガレージに飛んでいくので，大切に扱って下さい．そして，樽床や小竹達の力で，頑張って IGVC 優勝してきて下さい．

他にも楽しい研究室生活を支えてくれた，生体班の大村，松島，山崎，いつも用もないのに 4 階でプラプラしていた森田，また，その他の研究室の皆さん．本当にありがとう．

また，私の M1 時代をサポートしてくれた先輩方にも感謝します．石川さん，石垣さん，大川さん，木島さん，小林さん，山本さん，吉田さん，就活のときのエントリーシート添削は本当にタメになりました．おかげさまで，無事就職し，卒業することができます．ありがとうございました．安藤さんには，マイコンについて色々と指導や助言をしていただき，ありがとうございました．し

かしながら，生体班の深夜の騒がしい下ネタ談義が今でも印象的です．伊東さんは，ことあるごとに「小俣，小俣」とかわいがってくれて，どうもありがとうございました．少し迷惑でした．また，昨年の愛知万博時にみそかつをおごっていただき，ありがとうございました．今度名古屋に行ったときは，蓬来軒のひつまぶしをおごって下さい．

◇　ＲＯＢＯ－ＯＮＥ関係者の方

バンプレストの大友さん，本田さん．私がバンプレストのお仕事を手伝う上で出会った人と少しでもお話できたことは，凄く私にとって勉強になりました．ROBO-ONE 委員長の西村さん，ベステクの津藤さん，イクシスの中川さん，浅野さん，ダイナマイザー製作者の杉浦さんとその息子さん達など，こういった先端技術をもった人と触れ合えたことは，かけがえのない経験となりました．ありがとうございました．そして，来年からよろしくお願いします．

ヒューマノイドロボット読書会でお会いした，西さん，杉浦さん，Jin さん，千葉工大の中野さんなど，多くの人とお話できたことも，私にとってかけがえのない経験となりました．ありがとうございました．そして，これからもよろしくお願いします．

◇　家族

何を語っても家族の協力なしに，今の私やナベ☆ケンはありません．板金を文句 1 つ言わず，無料でやってくれた父親，連日の徹夜にもびくともしない強靭な体に生んでくれて，金銭的なバックアップや雑用をこなしてくれた母親や祖母には，本当に感謝しています．

学生時代にはなかなか親孝行できなかったけど，卒業したらロボットを通じて大きくなった自分を見せることができると思います．それが一番の親孝行だと思っているので，手塩に掛けて育ててくれた恩を忘れずに，これからも頑張ります．

その他，カジローメイトの徳田，宮田をはじめ，楽しい学生生活をサポートしてくれた人達，ホームページ上で有益な情報を提供してくれる多くの技術者の皆さん・・・

本当にありがとうございました．

参 考 文 献

[1] 日本ロボット学会（編）: 新版　ロボット工学ハンドブック，コロナ社，(2005)

[2] 宮崎主哉（編）: 解剖!歩く ASIMO　二足歩行ロボット・アシモー歩行システムの秘密，技術評論者，(2004)

[3] 森政弘（編集顧問）: 愛知万博　最新ロボットガイド，オーム社，(2005)

[4] 吉田典之：ロボットもの知り百科，電波新聞社，(2003)

[5] 三浦宏文（監修）: ハンディブック　メカトロニクス改訂 2 版，オーム社（2005）

[6] ROBO-ONE 委員会（編）: 二足歩行ロボットのモデルベース開発，オーム社，(2005)

[7] 脇原将孝（編）: 最新電池技術，リアライズ社，(1990)

[8] 池田宏之助（編著），武島源二，梅尾良之：図解　電池のはなし，日本実業出版社，(1996)

[9] 岡田和夫：電池のサイエンス，森北出版，(1997)

[10] 門田和雄：ロボコンに挑戦! 図解　もの創りのためのおもしろいロボット工学，技術評論社，(2004)

[11] 渡辺嘉二郎：制御工学，サイエンスハウス，(1998)

[12] 鈴森康一：ロボット機構学，コロナ社，(2004)

[13] 下嶋浩，佐藤治：ロボット工学，森北出版，(1999)

[14] 川村貞夫：図解　ロボット制御入門，オーム社，(2000)

[15] 米田完，坪内孝司，大隅久 : はじめてのロボット創造設計，講談社サイエンティフィク，(2003)

[16] 市川誠：玩具とロボティクス，日本ロボット学会誌，Vol.18, No.2, pp.160/161，(2000))

[17] 畑村洋太郎：失敗学のすすめ，講談社，(2000)